

สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง (13.56 MHz)  
Antenna for RFID reader at HF frequency (13.56 MHz)



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต  
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง (13.56 MHz)

Antenna for RFID reader at HF frequency (13.56 MHz)



T147899



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **147899**  
ในเดือนปี **๕/6 ๒๕๖๐**

b. 12862957  
l. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต  
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Antenna for RFID reader at HF Frequency (13.56 MHz)



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MANUFACTURING SYSTEM ENGINEERING  
COLLEGE OF ADVANCED MANUFACTURING INNOVATION  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง (13.56 MHz) Antenna for RFID Reader at HF Frequency (13.56 MHz)
ชื่อนักศึกษา	นายกิตติพล ก้านขุนทด รหัสนักศึกษา 56120006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชา	เทคโนโลยีระบบการผลิต
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฉัตรพล ภาคศิริ

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.เลิศศักดิ์ เลขาวัต กรรมการ	
ดร.สันหัตต์ ชวงศ์อินทร์ กรรมการ	
ดร.ฉัตรพล ภาคศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง (13.56 MHz) Antenna for RFID reader at HF frequency (13.56 MHz)
ชื่อนักศึกษา	นาย กิตติพล ก้านขุนทด รหัสนักศึกษา 56120006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชา	เทคโนโลยีระบบการผลิต
คณะ	วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฉัตรพล ภาคศิริ

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยี RFID (Radio frequency Identification) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในด้านต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ด้านธุรกิจบริการ ธุรกิจสินค้าคงคลังและการจัดส่งสินค้า การบริหารจัดการด้านความปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอุตสาหกรรมการผลิต อาร์เอฟไอดีเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญ เนื่องจากการใช้อาร์เอฟไอดีจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการผลิตสามารถถูกเข้าถึงได้แบบทันที (real-time access) ข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเช่น ตารางเวลาการผลิต จำนวนวัตถุดิบในการผลิต การบรรจุ ฯลฯ สามารถส่งผ่านอาร์เอฟไอดีไปยังฝ่ายควบคุมการผลิต ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตสูงขึ้นโดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นแบบตามลำดับ ทางผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาสายอากาศของตัวส่งสัญญาณ (RFID Reader) ที่สามารถใช้งานในย่านความถี่ 13.56 MHz ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นทั้งด้านกำลังและขอบเขตการอ่านเพื่อใช้ในด้านอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อช่วยทำให้เกิดความสะดวกในกระบวนการและทำให้ง่ายในการตรวจสอบปัญหาในไลน์การผลิต

ในโครงการนี้จะศึกษาการปรับปรุงสายอากาศของเครื่องอ่าน RFID ด้วยแผ่นเฟอร์ไรต์ผลการจำลองสนามแม่เหล็กแสดงให้เห็นว่าที่ความสูงจากตัวสายอากาศเท่ากันสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์ให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่าสายอากาศธรรมดาและจากการใช้แมทซิงเน็ตเวิร์คที่เหมาะสมเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์มีระยะการอ่านมากกว่าเครื่องอ่านที่ใช้สายอากาศแบบธรรมดาในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะและสภาพแวดล้อมที่ไม่มีโลหะ

**คำสำคัญ :** สายอากาศ, เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี, อาร์เอฟไอดี, อิมพีแดนซ์แมทซิง

<b>Title</b>	Antenna for RFID reader at HF frequency (13.56 MHz)
<b>Students</b>	Mr.Kittipon Kankhunthod Student ID 56120006
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering (Manufacturing System Engineering)
<b>Department</b>	Manufacturing System Technology
<b>Faculty</b>	College of Advanced Manufacturing Innovation
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2016
<b>Advisor</b>	Dr.Chatrpol Pakasiri

### Abstract

Nowadays, RFID (Radio Frequency Identification) system has played a key role in many aspects such as service, inventory, logistic, security management and especially industrial manufacturing process because RFID can provide real-time assessment in manufacturing information. For example, production schedule, raw materials, packaging process, etc. This information, transmitted to production control department, helps the department to improve the efficiency of the production process, especially complex or non-sequence process. Hence, the author has realized the importance of improving the transponder antenna (RFID reader's antenna) operating at high frequency (13.56 MHz) in terms of transmitting power and reading range to make tracking and troubleshooting in the production line easier.

In this research, performance of the planar loop antenna of RFID reader is improved with additional ferrite sheet. The field simulated results show that the antenna with undercover ferrite sheet provides more magnetic flux density at the same distance away from it. By using proper matching networks, the RFID Reader with undercover ferrite sheet planar antenna provides longer reading range than conventional planar RFID reader in both metallic and non-metallic environments.

**Keywords:** Antenna, Impedance matching, RFID, RFID Reader

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ดร.ฉัตรพล ภคศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ซึ่งท่านได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญาโทเล่มนี้ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำเนิงานอีกด้วย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณน้อง ๆ ใน Research Group ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



กิตติพล ก้านขุนทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และสงวนลิขสิทธิ์ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 ระบบ RFID.....	3
2.2 การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายไมโครเวฟ.....	13
2.3 คุณลักษณะของเน็ตเวิร์คสองทาง (2 Port Network).....	23
2.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กพื้นฐานของสารเฟอร์ไรต์.....	26
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน</b> .....	<b>29</b>
3.1 การทำอิมพีแดนซ์แมทชิงของสายอากาศเข้ากับตัวส่งที่ความถี่ต่าง ๆ.....	29
3.2 การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศ.....	38
3.3 การออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz.....	48

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	59
4.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศจากการทำ อิมพีแดนซ์แมทชิงโดยการวัดด้วยความถี่ต่าง ๆ .....	59
4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศ.....	67
4.3 ผลการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz.....	70
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	73
5.1 สรุปผล.....	73
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน.....	74
5.3 แนวทางในการพัฒนา.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	99
ประวัติผู้จัดทำ.....	106

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถี่ที่ใช้ในการแมทชิงอิมพีแดนซ์ และค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรแมทชิง.....	32
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างตารางเก็บค่า s พารามิเตอร์ ของสายอากาศที่มีแมทชิงเนตเวิร์คที่ความถี่ 1 MHz – 1 GHz.....	34
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางเก็บค่า s พารามิเตอร์ ของสายอากาศที่ไม่มีแมทชิงเนตเวิร์คที่ความถี่ 1 MHz – 1 GHz.....	35
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางการเก็บค่า s พารามิเตอร์ ของแมทชิงเนตเวิร์คที่ความถี่ 1 MHz - 1 GHz.....	37
ตารางที่ 3.5 แมทชิงเนตเวิร์คของระบบสายอากาศที่ระยะการวัดต่าง ๆ .....	44
ตารางที่ 3.6 อธิบายการทำงานของขา Pin ต่าง ๆ ของ Module Pi-931MD.....	49
ตารางที่ 3.7 แสดงค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรแมทชิง.....	56
ตารางที่ 4.1 สรุปผลความถี่เรโซแนนซ์จากทั้ง 3 วิธีของสายอากาศทั้ง 2 ชนิด.....	66
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของ สายอากาศทั้ง 2 ชนิดที่ความสูงต่าง ๆ .....	67
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Power gain ของระบบสายอากาศ.....	69
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะต่าง ๆ ของสายอากาศทั้งสองแบบในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะและไม่มีโลหะ.....	70
ตารางที่ 4.5 แสดงระยะการอ่าน Tag สูงสุดที่มุมต่าง ๆ ของเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศแบบธรรมดา.....	71
ตารางที่ 4.6 แสดงระยะการอ่าน Tag สูงสุดที่มุมต่าง ๆ ของเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์.....	71

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบ RFID.....	3
2.2 ตำแหน่งของแท็กที่เหมาะสมสำหรับ ย่านของสายอากาศที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ.....	5
2.3 การอ่าน/เขียนข้อมูลอย่างง่ายของ RFID .....	5
2.4 แท็กในรูปแบบต่าง ๆ .....	7
2.5 ตัวอย่างการใช้งานแท็กและตัวอ่านข้อมูล (Reader) .....	7
2.6 แผนผังการทำงานของระบบ RFID .....	9
2.7 การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า.....	11
2.8 ตัวอย่างสัญญาณ Amplitude Modulation .....	12
2.9 การติดต่อกันระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก.....	12
2.10 ตัวอย่างภาครับ.....	13
2.11 อิมพีแดนซ์และรีแอคแตนซ์.....	14
2.12 อินพุตอิมพีแดนซ์.....	16
2.13 เอาต์พุตอิมพีแดนซ์.....	17
2.14 แผนผังของสายนำสัญญาณที่ไม่มีการสูญเสียเมื่อพิจารณาที่ความยาวสั้น ๆ .....	18
2.15 อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณแบบ Twin-lead .....	19
2.16 อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณแบบ Coaxial.....	20
2.17 แผนผังการต่อสายส่งสัญญาณแบบมีการสูญเสียกับโหลดอิมพีแดนซ์.....	21
2.18 ตัวอย่างเน็ตเวิร์คสองทาง.....	24
2.19 กราฟแสดงการไหลของสัญญาณของเน็ตเวิร์คสองทาง.....	26
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	30
3.2 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ).....	30

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ).....	31
3.4 โครงสร้างของสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร.....	31
3.5 ส่วนประกอบของแมทซิงเน็ตเวิร์ค.....	32
3.6 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.7 การเชื่อมต่อสายอากาศที่มีแมทซิงเน็ตเวิร์คกับ Network Analyzer.....	33
3.8 Schematic ของการวัดค่าสายอากาศที่มีแมทซิงเน็ตเวิร์ค.....	34
3.9 การเชื่อมต่อแมทซิงเน็ตเวิร์คกับ Network Analyzer.....	36
3.10 Schematic ของการวัดค่าแมทซิงเน็ตเวิร์ค.....	36
3.11 Schematic จำลองวงจรสายอากาศรวมกับแมทซิงเน็ตเวิร์คโดยใช้โปรแกรม ADS.....	38
3.12 โครงสร้างของสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร.....	39
3.13 โมเดลสายอากาศที่ใช้ในการจำลอง.....	39
3.14 แสดงระนาบการวัดความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก ของสายอากาศที่ระยะ 2, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร.....	40
3.15 ระบบสายอากาศแบบ 2 พอร์ต.....	41
3.16 อุปกรณ์การทดลอง.....	43
3.17 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ).....	43
3.18 แมทซิงเน็ตเวิร์คของระบบสายอากาศ.....	44
3.19 เนื้อหาภายในไฟล์ .s2p.....	45
3.20 วงจรในการจำลองสายอากาศ.....	45
3.21 อุปกรณ์การทดลอง.....	46
3.22 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ).....	47
3.23 การวัดค่า s parameters ของระบบสายอากาศ.....	47
3.24 ส่วนประกอบและขาเชื่อมต่อของ Module Pi-931MD.....	48
3.25 Block diagram อย่างง่ายของ Module Pi-931MD.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และสงวนลิขสิทธิ์เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 แสดง Block diagram ของเครื่องอ่าน RFID Pi-931-X34CC.....	52
3.27 แสดงแมทซิงเน็ตเวิร์คของเครื่องอ่าน RFID.....	52
3.28 แสดงโครงสร้างของสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร.....	53
3.29 อุปกรณ์การทดลอง.....	54
3.30 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ).....	54
3.31 การต่อสายอากาศสำหรับการวัดค่า s parameters แบบ 2 พอร์ต.....	55
3.32 แสดงการแบ่งครึ่งระบบเครื่องอ่าน RFID.....	55
3.33 แสดงวงจรของเครื่องอ่าน RFID และแมทซิงเน็ตเวิร์ค.....	56
3.34 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับอ่าน RFID HF SDK_V1.....	57
3.35 แสดงการวัดระยะการอ่านสูงสุดของเครื่องอ่าน RFID.....	57
3.36 การวัดระยะการอ่านของเครื่องอ่าน RFID ในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ.....	58
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz.....	60
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz.....	61
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz.....	61
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz.....	62
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz.....	62
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz.....	63
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz.....	63

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz.....	64
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz.....	64
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz.....	65
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz.....	65
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz.....	66
4.13 กราฟเปรียบเทียบความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ ของสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์.....	68
4.14 แสดงค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ระยะความสูงต่าง ๆ .....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

อาร์เอฟไอดี (RFID ย่อมาจากคำเต็มว่า Radio-frequency identification) เป็นวิธีการในการเก็บข้อมูลหรือระบุข้อมูลแบบอัตโนมัติ โดยทำงานผ่านการรับสัญญาณจากแท็ก (tag) เข้าสู่ตัวส่งสัญญาณ (RFID reader) ผ่านทางคลื่นวิทยุ แท็กของอาร์เอฟไอดีโดยปกติจะมีขนาดเล็กซึ่งสามารถติดตั้งเข้ากับผลิตภัณฑ์สินค้า สัตว์ บุคคลได้ ซึ่งเมื่อตัวส่งสัญญาณส่งคลื่นวิทยุไป และพบเจอแท็กนี้ สัญญาณจะถูกส่งกลับพร้อมกับข้อมูลที่เก็บไว้ในแท็ก โดยตัวส่งสัญญาณนี้เองยังสามารถบันทึกข้อมูลลงในแท็กได้

ปัจจุบันเทคโนโลยี RFID (Radio frequency Identification) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในด้านต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ด้านธุรกิจบริการ ธุรกิจสินค้าคงคลังและการจัดส่งสินค้า การบริหารจัดการด้านความปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอุตสาหกรรมการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ที่แตกต่างกันไปในแต่ละด้านซึ่งอยู่บนหลักการพื้นฐานเดียวกัน คือ การใช้คลื่นวิทยุเพื่อระบุตัวตนของวัตถุหรือเจ้าของวัตถุที่ติดป้าย RFID (tag) แทนการระบุด้วยวิธีการอื่น ตัวอย่างเช่น การนำ RFID เข้ามาแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) ซึ่งทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการยิงอ่านบาร์โค้ดสินค้าทีละชิ้น , การนำ RFID มาแทนการใช้บัตรรูทแบบแถบแม่เหล็ก โดยใช้วิธีการแทนการรูทแบบเดิมซึ่งจะทำให้แถบแม่เหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ , การใช้ในด้านอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตโดยการติด Tag RFID ไว้กับชิ้นส่วนในไลน์การผลิตเพื่อตรวจสอบเวลาในแต่ละกระบวนการ ทำให้สะดวกและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอีกด้วย

ทางผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาสายอากาศของตัวส่งสัญญาณ (RFID Reader) ที่สามารถใช้งานในย่านความถี่ 13.56 MHz ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อใช้ในด้านอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อช่วยทำให้เกิดความสะดวกในกระบวนการและทำให้ง่ายในการตรวจสอบปัญหาในไลน์การผลิต

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อศึกษาหลักการพื้นฐานของ RFID
- 1.1.2 สามารถนำความรู้จากภาคทฤษฎีมาใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้งานได้จริง
- 1.1.3 ออกแบบสายอากาศและวงจร Matching Network ของสายอากาศสำหรับทำงานในย่านความถี่สูง (13.56 MHz)
- 1.1.4 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการอ่านของเครื่องอ่าน RFID เมื่อเพิ่มแผ่นเฟอร์ไรต์ที่สายอากาศ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

โครงการเล่มนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่เป้าหมายในการประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรม โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาสายอากาศที่สามารถใช้งานในย่านความถี่สูง (13.56 MHz)
- 1.3.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Advanced Design System ในการออกแบบและการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศ
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการวัดและการทำการ Matching Impedance ของสายอากาศกับตัวส่งสัญญาณ (RFID Reader) และผลที่เกิดจากรายการเฟอร์ไรต์ต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ

## 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

- 1.4.1 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Advanced Design System ในการออกแบบและการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศ
- 1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการวัดและทดสอบความถูกต้องของการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ
- 1.4.3 สร้างสายอากาศต้นแบบที่ใช้งานได้จริงกับเครื่องส่งสัญญาณ (RFID Reader) ในความถี่ 13.56 MHz รวมถึงการศึกษาผลของสารเฟอร์ไรต์ที่มีต่อการอ่านของเครื่องอ่าน RFID
- 1.4.4 สรุปผลการทำโครงการ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 รู้และเข้าใจหลักการทำงานและประโยชน์รวมถึงความสำคัญของเทคโนโลยี RFID ในการประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม
- 1.5.2 สามารถสร้างสายอากาศของตัวส่งสัญญาณที่สามารถประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีความถี่ 13.56 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

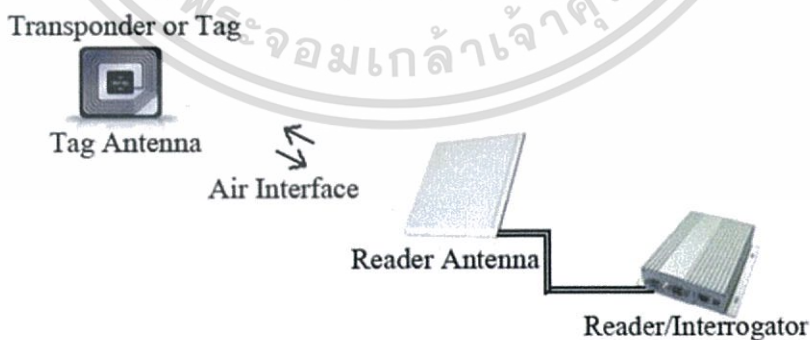
# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ระบบ RFID [1]

RFID ย่อมาจากคำว่า Radio Frequency Identification เป็นระบบฉลากหรือป้ายอิเล็กทรอนิกส์ (Tag) ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการใช้งานที่ระบบฉลากแบบบาร์โค้ดไม่สามารถใช้ได้ โดยจุดเด่นของ RFID คือ ความสามารถในการอ่านข้อมูลของฉลากได้โดยไม่ต้องมีการสัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม่นยำแม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แร่งสั่นสะเทือน การกระแทก และสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงปัจจุบันมีการนำ RFID มาประยุกต์ใช้งานหลากหลายไม่ว่าจะเป็นในบัตรชนิดต่าง ๆ เช่นบัตรประจำตัวประชาชน บัตรเอทีเอ็ม บัตรสำหรับผ่านเข้าออกห้องพัก บัตรโดยสารของสายการบินบัตรจอดรถ ในฉลากของสินค้าหรือแม้แต่ใช้ฝังลงในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติ เป็นต้น การนำ RFID มาใช้งานก็เพื่อประโยชน์ในการตรวจสอบการผ่านเข้าออกบริเวณใดบริเวณหนึ่ง หรือเพื่ออ่านหรือเก็บข้อมูลบางอย่างเอาไว้ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่เป็นฉลากสินค้า RFID ก็จะถูกนำมาใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับสินค้า เพื่อให้สามารถทราบถึงที่มาที่ไปของสินค้าชิ้นนั้น ๆ ได้ เป็นต้น สำหรับรูปแบบของเทคโนโลยี RFID ที่ใช้ในการดังกล่าวก็มีทั้งแบบสมาร์ทการ์ด (Smart Card) ที่สามารถถูกเขียนหรืออ่านข้อมูลออกมาได้โดยไม่ต้องมีการสัมผัสกับเครื่องอ่านบัตรหรือคอนแทคเลสสมาร์ทการ์ด (Contact less Smart card) เหรียญ ป้ายชื่อหรือฉลากซึ่งมีขนาดเล็กมากจนสามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษหรือฝังเอาไว้ในตัวสัตว์ได้

เครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สามารถอ่านแท็กที่อยู่ไกลได้ ในระยะห่างประมาณ 6-12 เมตร และความเร็วที่สามารถตรวจจับข้อมูลได้อย่างเสถียรเมื่อรถเคลื่อนที่ผ่านได้ในช่วงความเร็วประมาณ 60 กม./ชั่วโมง

#### 2.1.1 องค์ประกอบของระบบ RFID



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบ RFID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบในระบบ RFID จะมีหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกคือฉลากหรือป้ายขนาดเล็กที่จะถูกผนึกอยู่กับวัตถุที่เราสนใจ โดยฉลากนี้จะทำการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุนั้น ๆ เอาไว้ ฉลากดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ทรานสปอนเดอร์ (Transponder, Transmitter & Responder) หรือที่เรียกกันโดยทั่ว ๆ ไปว่า “แท็ก” (Tag) ส่วนที่สองก็คืออุปกรณ์สำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็ก มีชื่อเรียกอย่างรวม ๆ ว่า ทรานสซิฟเวอร์ (Transceiver, Transmitter & Receiver) หรือที่เรียกกันโดยทั่ว ๆ ไปว่า “เครื่องอ่าน” (Reader) ทั้งสองส่วนติดต่อสื่อสารถึงกัน โดยอาศัยคลื่นความถี่วิทยุสัญญาณนี้ผ่านได้ทั้งโลหะและอโลหะแต่จะไม่สามารถติดต่อกับเครื่องอ่านให้อ่านได้โดยตรง เมื่อเครื่องอ่านส่งข้อมูลผ่านความถี่วิทยุในรูปที่ 2.1 แสดงถึงความต้องการข้อมูลที่ถูกระบุไว้จากป้าย ป้ายจะตอบข้อมูลกลับและเครื่องอ่านจะส่งข้อมูลต่อไปยังส่วนประมวลผลหลักของคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องอ่านจะติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านสายเครือข่าย LAN (Local Area Network) หรือส่งผ่านทางความถี่วิทยุจากทั้งอุปกรณ์มีสายและอุปกรณ์ไร้สาย

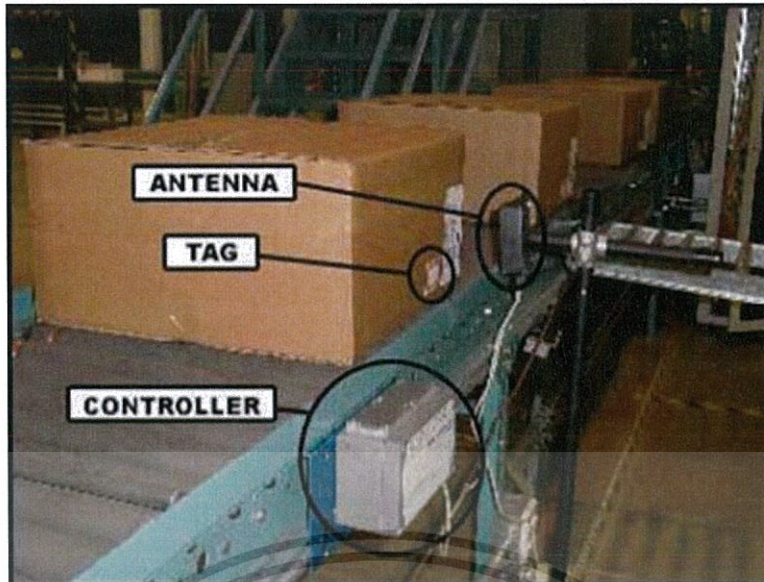
### 2.1.2 แท็ก (Tag) หรือ ทรานสปอนเดอร์ (Transponder)

แท็ก (Tag) นั้นเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทรานสปอนเดอร์ (Transponder) มาจากคำว่า ทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) ผสมกับคำว่าเรสปอนเดอร์ (Responder) ถ้าจะแปลให้ตรงตามศัพท์ แท็กก็จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณหรือข้อมูลที่บันทึกอยู่ในแท็กตอบสนองไปที่ตัวอ่านข้อมูล การสื่อสารระหว่างแท็กและตัวอ่านข้อมูลจะเป็นการสื่อสารกันโดยอาศัยช่องความถี่วิทยุผ่านอากาศโครงสร้างภายในแท็กจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ส่วนของไอซี (Integrated Circuit) ซึ่งเป็นชิปสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Chip) และส่วนของขดลวดซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งข้อมูลโดยทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมต่อกันด้วยกันไอซีของแท็กที่มีการผลิตออกมาจะมีทั้งขนาดและรูปร่างแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็น หรือไปจนถึงขนาดใหญ่จนสะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปโครงสร้างภายในส่วนที่เป็นไอซีของแท็กนั้นก็ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ส่วนของการควบคุมภาครับส่งสัญญาณวิทยุ สำหรับโครงสร้างของส่วนนี้ประกอบด้วยภาคมอดูเลต (Modulation) และภาคดีมอดูเลต (Demodulation) (สำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างแท็กกับตัวเครื่องอ่าน) และวงจรกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
2. ส่วนของการควบคุมภาคดิจิทัล ซึ่งรับหน้าที่จัดการเกี่ยวกับกระบวนการทางดิจิทัลทั้งหมด โครงสร้างหลัก ๆ ของส่วนการทำงานนี้ประกอบด้วย ส่วนบันทึกข้อมูล (ประกอบด้วยหน่วยความจำแรม (RAM) รอม (ROM) อีอีพรอม (EEPROM) ส่วนของการเข้ารหัส (Crypts Unit) ส่วนตอบรับสัญญาณร้องขอ (Answer to Request) ส่วนควบคุมและประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Control and Arithmetic Unit)

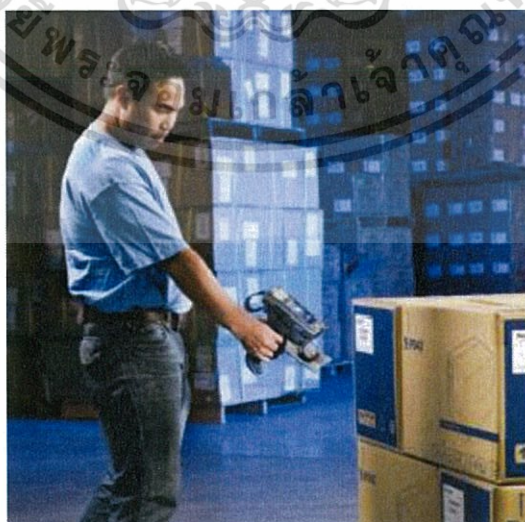
อย่างไรก็ตามโครงสร้างภายในของแท็กที่ต่างผู้ผลิตหรือต่างรุ่นกันบางครั้งก็อาจมีไม่ครบถ้วนทุกส่วนอย่างที่ได้ออกมา ซึ่งรายละเอียดโครงสร้างตลอดจนรายละเอียดในการทำงานของแท็กเบอร์ใด ๆ ก็สามารถดูได้จากดาต้าชีตของบริษัทผู้ผลิตแท็กเบอร์นั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของแท็กที่เหมาะสมสำหรับยานของสายอากาศที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทรานสปอนเดอร์หรือแท็กมีลักษณะเป็นไมโครชิพ (Microchip) ที่ยอมให้ผู้ใช้ติดเข้าระหว่างชั้นของกระดาษหรือพลาสติกที่ใช้ทำป้ายฉลาก ชิพหรือแท็กอาจมีรูปร่างได้หลายแบบขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน โดยอาจมีรูปร่างเหมือนบัตรเครดิตในการใช้งานทั่วไป หรือเล็กขนาดไส้ดินสอยาวเพียง 10 มิลลิเมตร เพื่อฝังเข้าไปใต้ผิวหนังสัตว์ในกรณีนำไปใช้ในงานปศุสัตว์ หรืออาจมีขนาดใหญ่มากสำหรับแท็กที่ใช้ติดกับเครื่องจักรขณะทำการขนส่ง แท็กอาจนำไปติดไว้กับสินค้าในร้านค้าปลีกทั่วไป เพื่อป้องกันขโมย โดยจะมีการติดตั้งสายอากาศของตัวอ่านข้อมูลขนาดใหญ่ไว้ตรงประตูทางออกเพื่อทำการตรวจจับขโมย โดยแท็กจะรับพลังงานจากสัญญาณ RF เพื่อติดต่อสื่อสารกับเครื่องอ่าน หรือใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่บรรจุภายในป้าย ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ Lithium ion มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน จึงมักนำมาใช้กับแผ่นป้ายนี้



รูปที่ 2.3 การอ่าน/เขียนข้อมูลอย่างง่ายของ RFID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท็กจะประกอบไปด้วยสายอากาศที่มีขนาดเล็กที่จะช่วยให้แท็กตอบสนองกับเครื่องอ่าน โดยสายอากาศจะแผ่สัญญาณวิทยุจำนวนหนึ่งออกมา เพื่อกระตุ้นให้แท็กอ่านหรือเขียนข้อมูลลงไปในสายอากาศสามารถทำได้ทุกขนาดและรูปร่าง เพื่อที่จะสามารถออกแบบให้ติดตั้งได้ทุกที่และเพื่อให้เกิดความครอบคลุมได้ดีที่สุดในหลาย ๆ ระบบสายอากาศจะถูกติดไปโดยตรงกับ Transceiver เหมือนกับเป็นอุปกรณ์ติดกัน

ชิปที่อยู่ในแท็กจะมีหน่วยความจำซึ่งอาจเป็นแบบอ่านได้อย่างเดียว (ROM) หรือทั้งอ่านทั้งเขียน (RAM) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน โดยปกติหน่วยความจำแบบ ROM จะใช้เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการรักษาความปลอดภัย เช่นข้อมูลของบุคคลที่มีสิทธิผ่านเข้าออกในบริเวณที่มีการควบคุมหรือระบบปฏิบัติการ ในขณะที่ RAM จะใช้เก็บข้อมูลชั่วคราวในระหว่างที่แท็กและตัวอ่านข้อมูลทำการติดต่อสื่อสารกัน

นอกจากนี้อาจมีการนำหน่วยความจำแบบ EEPROM มาใช้ในกรณีต้องการเก็บข้อมูลในระหว่างที่แท็กและตัวอ่านข้อมูลทำการสื่อสาร และข้อมูลยังคงอยู่ถึงแม้จะไม่มีพลังงานไฟฟ้าป้อนให้แก่แท็ก

แท็กที่มีการใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติต่างกันในแง่ของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงานอยู่ ซึ่งจะสามารถแยกออกเป็นหัวข้อดังนี้

1. แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active Tag) แท็กชนิดนี้จะมีแบตเตอรี่อยู่ภายในซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟขนาดเล็กเพื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แท็กทำงานโดยปกติ โดยแท็กชนิดนี้มีฟังก์ชันการทำงานทั่วไปทั้งอ่านและเขียนข้อมูลลงในแท็กได้และการที่ต้องใช้แบตเตอรี่จึงทำให้แท็กชนิดแอ็กทีฟมีอายุการใช้งานจำกัดตามอายุของแบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่หมดก็ต้องนำแท็กไปทิ้งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากจะมีการซีล (Seal) ที่ตัวแท็กจึงไม่สามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้อย่างไรก็ตามถ้าสามารถออกแบบวงจรของแท็กให้กินกระแสไฟน้อย ๆ ก็อาจจะมีอายุการใช้งานนานนับสิบปี

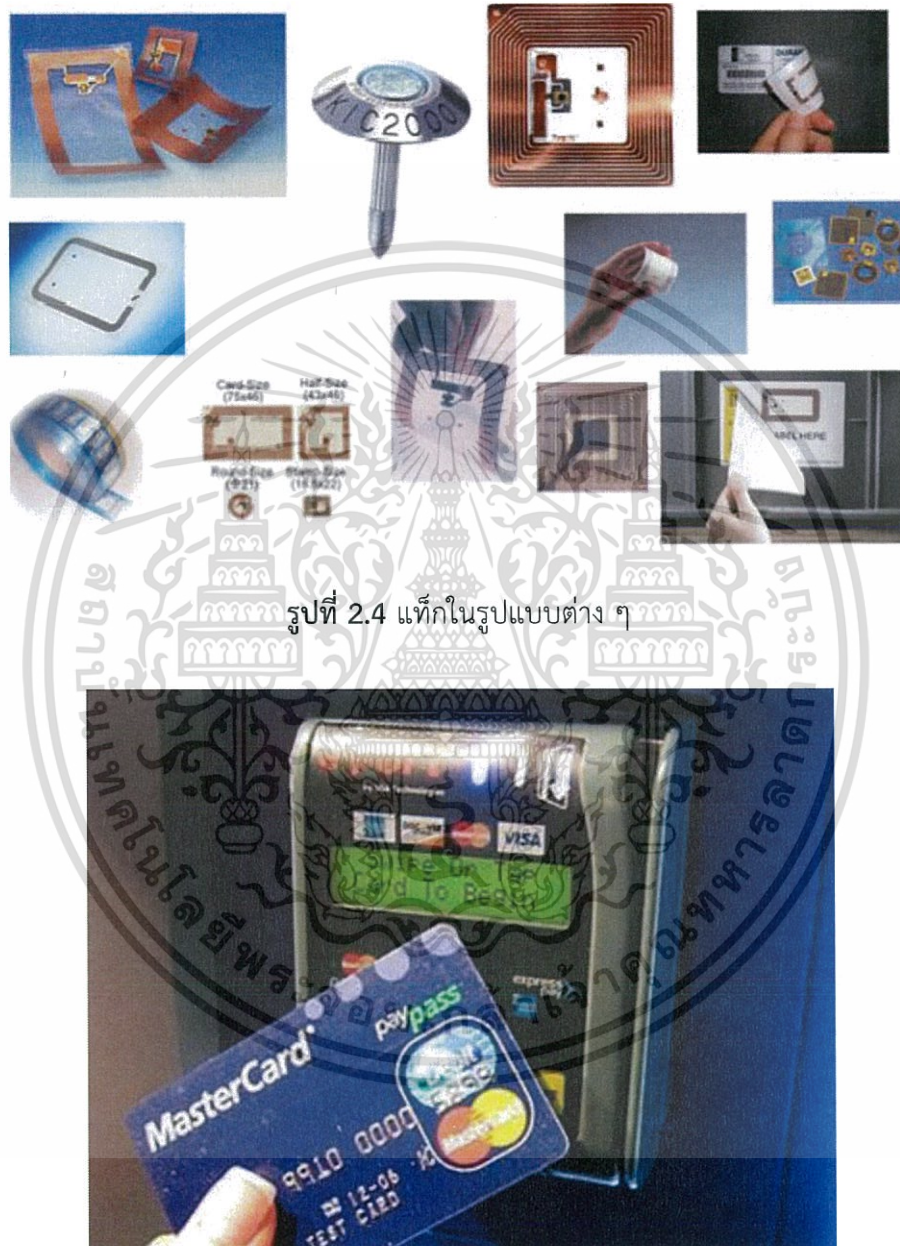
แท็กชนิดแอ็กทีฟนี้จะมีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่ได้ถึง 1 เมกะไบต์ มีกำลังส่งสูงและระยะการรับส่งข้อมูลไกลสูงสุดถึง 6 เมตร ซึ่งไกลกว่าแท็กชนิดพาสซีฟ นอกจากนี้ยังทำงานในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนได้ดีแม้แท็กชนิดนี้จะมีข้อดีอยู่หลายข้อแต่ก็มีข้อเสียอยู่ด้วยเหมือนกัน เช่น ราคาต่อหน่วยแพง มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีระยะเวลาในการใช้งานที่จำกัด

2. แท็กชนิดพาสซีฟ (Passive Tag) จะไม่มีแบตเตอรี่อยู่ภายในหรือไม่จำเป็นต้องรับแหล่งจ่ายไฟใด ๆ เพราะจะทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวอ่านข้อมูล (มีวงจรกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่ในตัว) หรือที่เรียกว่าอุปกรณ์ Transceiver จึงทำให้แท็กชนิดพาสซีฟมีน้ำหนักเบาและเล็กกว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ ราคาถูกกว่า และมีอายุการใช้งานไม่จำกัด แต่ข้อเสียก็คือระยะการรับส่งข้อมูลไกลซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ไกลสุดเพียง 1.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะการอ่านที่สั้น มีหน่วยความจำขนาดเล็กซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปประมาณ 32 ถึง 128 บิต และตัวเครื่องอ่านข้อมูลจะต้องมีความไวและกำลังที่สูง นอกจากนี้แท็กชนิดพาสซีฟมักจะมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสิ่งแวดล้อมที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูงอีกด้วย แต่ข้อได้เปรียบในเรื่องราคาต่อหน่วยที่ต่ำกว่าแท็กชนิดแอกทีฟและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ทำให้แท็กชนิดพาสซีฟเป็นที่นิยมมากกว่า

ไอซีของแท็กชนิดพาสซีฟที่มีการผลิตออกมาจะมีทั้งขนาดและรูปร่างเป็นแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่จนสะดุดตาซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการใช้งานแท็กและตัวอ่านข้อมูล (Reader)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการแท็กแบ่งจากชนิดที่ว่ามาแล้วแท็กก็ยังคงถูกแบ่งประเภทจากรูปแบบในการใช้งาน ได้เป็น 2 แบบ คือ

1. แบบที่สามารถถูกอ่านและเขียนข้อมูลได้อย่างอิสระ (Read-write)
2. แบบเขียนได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นแต่อ่านได้อย่างอิสระ (Write-One, Read-Many หรือ WORM)
3. แบบอ่านได้เพียงอย่างเดียว (Read-Only)

### 2.1.3 ตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator)

หน้าที่สำคัญของตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator) ก็คือการรับข้อมูลที่ส่งมาจากแท็กแล้วทำการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล ถอดรหัสสัญญาณข้อมูลที่ได้รับซึ่งกระทำโดยไมโครคอนโทรลเลอร์อัลกอริทึมที่อยู่ในเฟิร์มแวร์ (Firmware) ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณถอดรหัสสัญญาณที่ได้ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อนำข้อมูลผ่านเข้าสู่กระบวนการต่อไป นอกจากนี้ตัวอ่านข้อมูลที่ดียังต้องมีความสามารถในการป้องกันการอ่านข้อมูลซ้ำ เช่นในกรณีที่แท็กถูกวางทิ้งอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวอ่านข้อมูลสร้างขึ้นหรืออยู่ในระยะการรับส่ง ก็อาจทำให้ตัวอ่านข้อมูลทำการรับหรืออ่านข้อมูลจากแท็กที่อยู่เรื่อย ๆ ไม่สิ้นสุด

ดังนั้นตัวอ่านข้อมูลที่ดียังต้องมีระบบป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ที่เรียกว่าระบบ "Hands Down Polling" โดยตัวอ่านข้อมูลจะสั่งให้แท็กหยุดการส่งข้อมูลในกรณีเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวหรืออาจมีบางกรณีที่มีแท็กหลายแท็กอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมกันหรือที่เรียกว่า "Batch Reading" ตัวอ่านข้อมูลควรมีความสามารถที่จะจัดลำดับการอ่านแท็กทีละตัวได้

### ส่วนประกอบของตัวอ่านข้อมูล RFID

ตัวอ่าน RFID จะมีส่วนประกอบหลักดังนี้

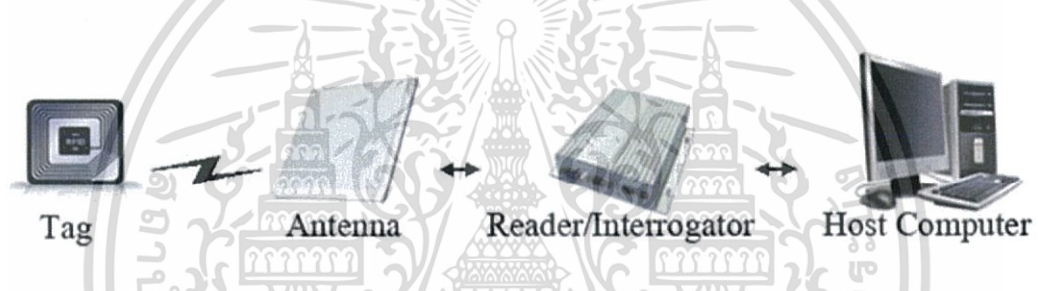
1. ภาคส่งสัญญาณวิทยุ เกิดจากส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่ภาคกำเนิดความถี่ซึ่งอาจจะเป็นคริสตอล ออสซิลเลเตอร์หรือวงจร LC ออสซิลเลเตอร์ วงจรเฟสล็อกเพื่อควบคุมความถี่ให้มีความแม่นยำมากขึ้นภาคขยายกำลัง (Power Amplifier) สำหรับขับกำลังออกไปที่สายอากาศ
2. ภาครับสัญญาณวิทยุ เป็นส่วนที่รับสัญญาณที่สะท้อนกลับคลื่นวิทยุจากสายอากาศ ซึ่งจะมีทั้งข้อมูลและสัญญาณพาหะกลับมาด้วย
3. ภาคประมวลผลดิจิทัล สัญญาณที่ได้จากภาคยังคงเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถนำไปใช้ได้ ต้องผ่านการประมวลผลต่าง ๆ เพื่อคัดกรอง แยกข้อมูลที่ต้องการนำไปใช้ต่อไป
4. ภาคติดกับภายนอก หลังจากที่ได้ข้อมูลจากส่วนประมวลผล แล้วข้อมูลจะต้องถูกส่งออกไปยังภายนอกหรือผู้ที่ให้นำข้อมูลไปใช้ซึ่งจะมีวิธีการเชื่อมต่อออกไปหลาย ๆ รูปแบบ ขึ้นกับขนาดของโครงการที่นำ RFID ไปใช้ในธุรกิจ การเชื่อมต่อต่าง ๆ เช่น RS-232 USB Ethernet CANbus หรือบางครั้งก็ต่อเข้าส่วนแสดงข้อมูลเช่นจอ LCD ได้เลยเช่นเครื่องอ่านแบบมือถือ ( Hand Held ) ในกรณีที่ต่อผ่าน RS-232 หรือ USB ก็จะเป็นการต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงเข้ากับคอมพิวเตอร์ ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและจัดเก็บลงฐานข้อมูลเพื่อประมวลผล รายงานต่อไป แต่ถ้าเชื่อมต่อผ่าน Ethernet จะเป็นการนำไปใช้ในระบบงานขนาดใหญ่ เช่นในโรงงานผลิตสินค้า หรือ ศูนย์กระจายสินค้า ต่าง ๆ นั้นเอง

#### 2.1.4 ลักษณะการทำงานของระบบ RFID

หัวใจของเทคโนโลยี RFID ได้แก่ "Inlay" ที่บรรจุอุปกรณ์และวงจรรีเลย์ทรอนิกส์กับโลหะที่ยืดหยุ่นได้สำหรับการติดตามหรือทำหน้าที่เป็นสายอากาศ Inlay มีความหนาสูงสุดอยู่ที่ 0.375 มิลลิเมตร สามารถทำเป็นแผ่นบางอัดเป็นชั้น ๆ ระหว่างกระดาษ แผ่นฟิล์ม หรือพลาสติกก็ได้ ซึ่งเป็นการผลิตเครื่องหมายหรือฉลาก จากวัสดุที่มีราคาไม่แพงมากนักซึ่งจะเห็นว่า Inlay มีลักษณะรูปร่างที่บางมาก จึงทำให้ง่ายต่อการติดเป็นป้ายชื่อหรือฉลากของชิ้นงานหรือวัตถุนั้น ๆ ได้สะดวก RFID เป็นระบบที่นำเอาคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สองชนิดที่เรียกว่า แท็ก (Tag) และตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator) ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless) โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศที่อยู่ในตัวรับข้อมูลดังแผนผังการทำงานของระบบ RFID ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานของระบบ RFID

การประยุกต์ใช้งาน RFID จะมีลักษณะการใช้งานที่คล้ายกับบาร์โค้ด (Bar code) และยังสามารถรองรับความต้องการอีกหลายอย่างที่บาร์โค้ดไม่สามารถตอบสนองได้ เนื่องจากบาร์โค้ดจะเป็นระบบที่อ่านได้อย่างเดียว (Read only) ไม่สามารถทำการเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่อยู่บนบาร์โค้ดได้ แต่แท็กของระบบ RFID จะสามารถทั้งอ่านและบันทึกข้อมูลได้ ดังนั้นเราจึงสามารถเปลี่ยนแปลงหรือทำการบันทึกข้อมูลที่อยู่ในแท็กได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน

นอกจากนี้ระบบ RFID ยังสามารถใช้งานได้แม้ในขณะที่วัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ เช่นในขณะสินค้ากำลังเคลื่อนที่อยู่บนสายพานการผลิต (Conveyor) หรือในบางประเทศก็มีการใช้ระบบ RFID ในการเก็บค่าผ่านทางด่วนโดยที่ผู้ใช้บริการทางด่วนไม่ต้องหยุดรถเพื่อจ่ายค่าบริการ ผู้ใช้บริการทางด่วนจะมีแท็กติดอยู่กับรถ และแท็กจะทำการสื่อสารกับตัวอ่านข้อมูล ผ่านสายอากาศขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่ตรงบริเวณทางขึ้นทางด่วนในขณะที่รถแล่นผ่านสายอากาศ ตัวอ่านข้อมูลก็จะคิดค่าบริการและบันทึกจำนวนเงินที่เหลือลงในแท็กโดยอัตโนมัติหรือแม้กระทั่งการใช้งานในปศุสัตว์เพื่อบันทึกประวัติหรือระบุความแตกต่างของสัตว์แต่ละตัวที่อยู่ในฟาร์ม

ข้อดีของระบบ RFID อีกอย่างก็คือ แท็กและตัวอ่านข้อมูลสามารถสื่อสารผ่านตัวกลางได้หลายอย่างเช่น น้ำ พลาสติก กระดาษ หรือวัสดุทึบแสงอื่น ๆ ในขณะที่บาร์โค้ดทำไม่ได้

### 2.1.5 วิธีการรับส่งข้อมูลระหว่างแท็กและเครื่องอ่าน

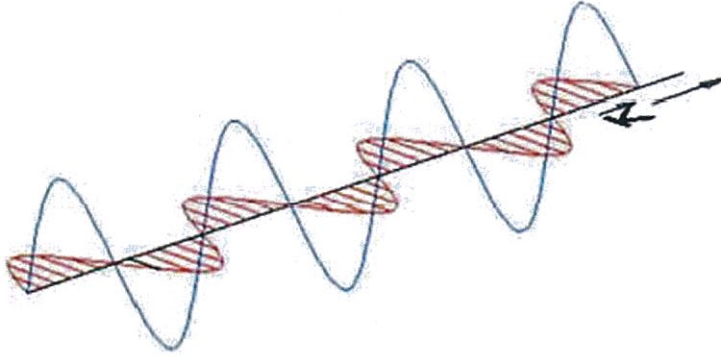
โดยมากมักจะใช้วิธีการมอดูเลตทางแอมพลิจูดหรือใช้การมอดูเลตทางแอมพลิจูดบวกกับการเข้ารหัสแมนเชสเตอร์ (Manchester encoded AM) แต่ทว่าในปัจจุบันก็มีแท็กที่ใช้การมอดูเลตแบบอื่น ๆ ด้วย เช่น การมอดูเลตแบบเฟสชิฟต์คีย์อิง (Phase Shift Keying : PSK) ฟรีควนซีฟต์คีย์ (Frequency Shift Keying : FSK) หรือการใช้การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation : FM)

ในการรับส่งข้อมูลหรือสัญญาณวิทยุระหว่างแท็กกับเครื่องอ่าน จะได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเมื่อสายอากาศมีความยาวที่เหมาะสมกับความถี่พาหะที่ใช้งาน เช่น เมื่อความถี่ใช้งานเป็น 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ ความยาวของสายอากาศ (เป็นเส้นตรง) ที่เหมาะสมก็คือ 22.12 แนนอนว่าในทางปฏิบัติคงไม่สามารถนำสายอากาศที่ใหญ่ขนาดนั้นมาใช้งานกับแท็กขนาดเล็กได้ สายอากาศที่ดูจะเหมาะสมจะใช้ร่วมกับแท็กมากที่สุดก็คือสายอากาศที่เป็นขดลวดขนาดเล็กหรือที่มีชื่ออย่างเป็นทางการว่าสายอากาศแบบแมกเนติกไดโพล (Magnetic dipole Antenna) รูปแบบของสายอากาศแบบนี้ก็จะมีอยู่หลากหลายทั้งแบบที่เป็นขดลวดพันแกนอากาศหรือแกนเฟอร์ไรต์ แบบที่เป็นวงลูปที่ทำขึ้นจากสายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ทั้งที่เป็นลูปแบบวงกลมและสี่เหลี่ยม ทั้งนี้ความเหมาะสมในการใช้งานก็แตกต่างกันไปตามความถี่พาหะและประเภทของงานด้วยเช่นกัน

นอกจากการรับส่งข้อมูลแล้วสายอากาศก็ยังทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับแท็กด้วยโดยอาศัยหลักการทำงานตามแนวคิดของไมเคิล ฟาราเดย์ เรื่องแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็ก (จากเครื่องอ่าน) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time-varying magnetic field) พุ่งผ่านสายอากาศของแท็ก เมื่อแท็กและเครื่องอ่านตั้งอยู่ห่างกันในระยะ 0.16 เท่าของความยาวของคลื่นพาหะที่ใช้ เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Transformer-type Coupling ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเดียวกับการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) ในทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer) จึงเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นในการส่งข้อมูลของแท็ก

### 2.1.6 หลักการทำงานของระบบ RFID

คลื่นวิทยุเป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า (Electronic Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ซึ่งเดินทางไปทิศทางด้วยกันแต่ทั้งสองสนามจะทำมุมตั้งฉากกัน (Orthogonal) เสมอ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางด้วยความเร็ว 299,792,458 เมตรต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับความเร็วแสง ที่ 300,000 กิโลเมตร/วินาที ในรูปที่ 2.7 เป็นการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่น่าสนใจ

1. ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางในการเคลื่อนที่
2. สามารถเปลี่ยนแปลงถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่งได้
3. สามารถถูกปล่อยออกมาและดูดกลืนได้โดยสสารหรือวัตถุใด
4. มีคุณสมบัติในการแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้

ในการนำคลื่นวิทยุมาใช้ในการบ่งชี้ จะมีหลักการทำงาน 2 วิธีการคือ

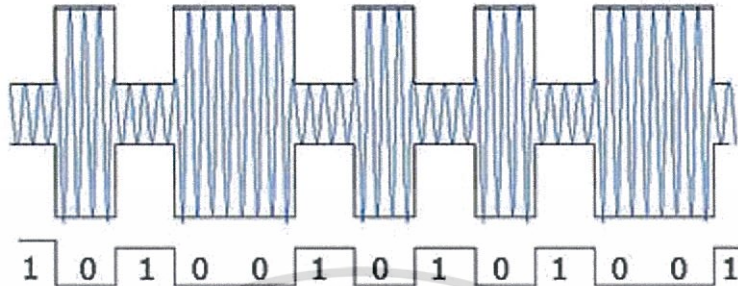
1. RFID ทำงานด้วยหลักการเหนี่ยวนำคลื่นวิทยุ (Inductive Coupling)
2. RFID ทำงานด้วยหลักการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (Propagation Coupling)

ทั้งสองแบบมีการทำงานที่แตกต่างกันทำให้ อุปกรณ์ในทางกายภาพก็也将มีความแตกต่างกันด้วยรายละเอียดของแต่ละวิธีการมีดังนี้

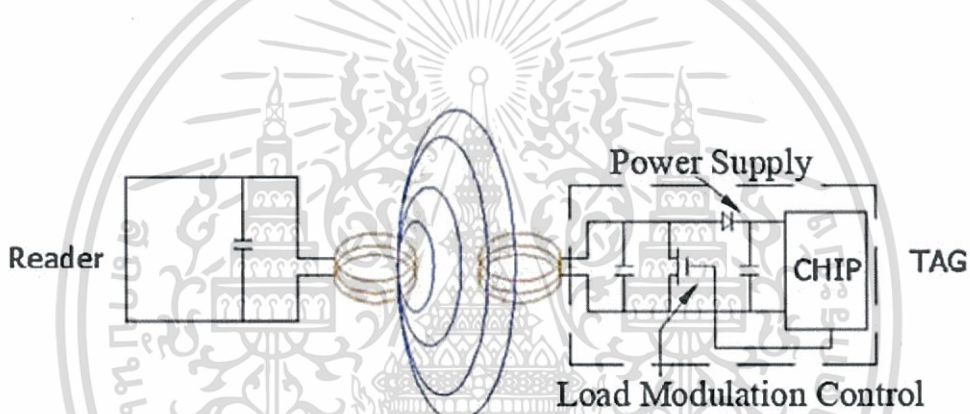
1. RFID ทำงานด้วยหลักการเหนี่ยวนำคลื่นวิทยุ (Inductive Coupling) เป็นวิธีการที่ใช้กันใน RFID ที่ทำงานในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงย้อนไปถึงหลักการของคลื่นวิทยุโดยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดกับขดลวดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดนั้น โดยหลักการของ RFID เมื่อเครื่องอ่าน (Reader) ต้องการค้นหาแท็กในบริเวณที่ครอบคลุมก็จะส่งกระจายคลื่นวิทยุออกไปในทุกทิศทางและเมื่อคลื่นวิทยุซึ่งก็คือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดกับขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศของแท็กก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขึ้นแต่เนื่องจากระดับของแรงดันนั้นมีน้อยมากจึงต้องมีการเพิ่มแรงดันซึ่งประกอบด้วยไดโอดจำนวนหนึ่งประกอบกันเป็นวงจรทวีคูณแรงดันจนระดับที่วงจรไมโครโพรเซสเซอร์ในแท็กทำงานได้และอ่านค่าประจำตัวของแท็กซึ่งเก็บอยู่ในหน่วยความจำมาเตรียมพร้อมที่จะส่งกลับซึ่งจริง ๆ แล้วแท็กไม่สามารถส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านได้โดยตรงแต่การส่งกลับจะใช้วิธีการ Load Modulation โดยไมโครโพรเซสเซอร์บนแท็กจะประพาดิตัวมันเองเป็นโพลิตให้กับเครื่องอ่านดึงและปล่อยสัญญาณเป็นจังหวะตาม ข้อมูลในแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิตของค่าประจำตัวของแท็กงานครบทุก ๆ บิตซึ่งด้านสายอากาศด้านรับของเครื่องอ่านก็จะมีภาครับสัญญาณที่สะท้อนกลับนี้ไปผ่านภาคถอดรหัสข้อมูลออกมา (demodulate) ซึ่งจะรับรู้หมายเลขของแท็กได้ โดยการเข้ารหัสนี้จะเป็นวิธีการที่เรียกว่า Amplitude Modulation ตัวอย่างสัญญาณ Amplitude modulation ดังรูปที่ 2.8

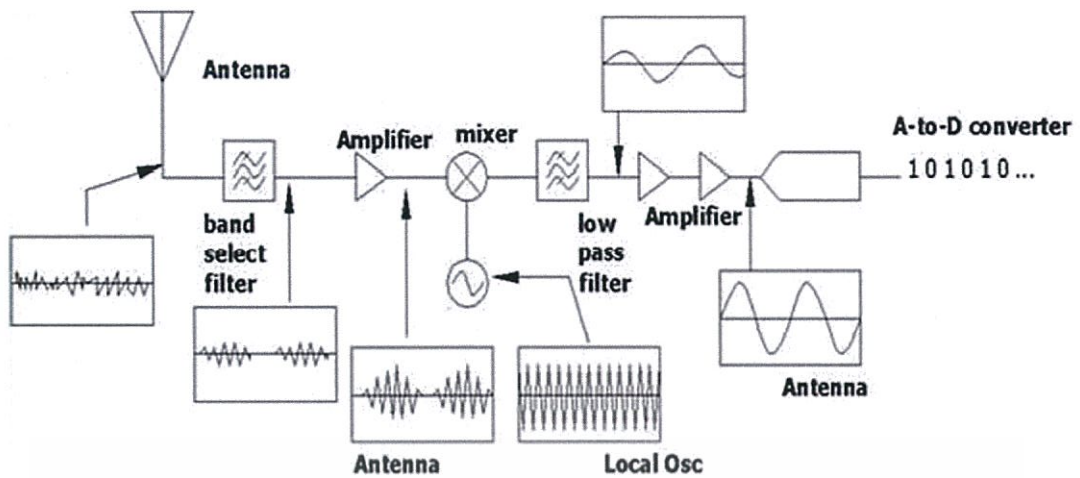


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสัญญาณ Amplitude Modulation



รูปที่ 2.9 การติดต่อกันระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก

2. RFID ทำงานด้วยหลักการแผ่กระจายคลื่นวิทยุ (Propagation Coupling) เป็นวิธีการที่ใช้กันใน RFID ที่ทำงานในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) จะเรียกว่าเป็นแบบแผ่กระจาย (propagation coupling) โดยเครื่องอ่านจะส่งพลังงานในรูปคลื่นวิทยุ (Electromagnetic Field) ออกมาทำให้เมื่อแท็กได้รับสัญญาณผ่านสายอากาศ แท็กก็จะทำงานโดยการสะท้อนกลับคลื่นที่ได้รับ ซึ่งจะเป็นค่า ID หรือรหัสประจำตัวกลับไปยังเครื่องอ่าน (Back Scattering) โดยวิธีการนี้ทำให้สามารถอ่านได้ระยะไกลมากกว่าแบบ Inductive Coupling ซึ่งโดยทั่วไปจะมีระยะตั้งแต่ 2 ถึง 10 เมตร ขึ้นอยู่กับกำลังส่ง ขนาดของเครื่องอ่านนั้น ๆ



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างภาครับ

## 2.2 การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายไมโครเวฟ

วงจรที่ทำงานในระบบความถี่ต่ำเช่นความถี่ 50 Hz หรือความถี่เสียง การนำชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุมาต่อเป็นวงจรโดยใช้เส้นลวดตัวนำ เรามักจะไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการส่งผ่านในเส้นลวดตัวนำนั้น ยกเว้นค่าความต้านทานในเส้นลวดตัวนำซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและเกิดแรงดันตกคร่อมที่เส้นลวดตัวนำบ้าง อย่างไรก็ตามเมื่อมองในด้านความถี่วิทยุโดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น เนื่องจากการเชื่อมโยงชิ้นส่วนในวงจรต่าง ๆ จะต้องทำด้วยสายนำสัญญาณชนิดต่าง ๆ ส่วนใหญ่ความยาวของสายนำสัญญาณเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะมีค่าที่ไม่อาจละเลยได้ เช่น อาจจะอยู่ในระดับเดียวกัน หรือยาวกว่าความยาวคลื่น ทำให้ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของเฟสตามความยาวของสายนำสัญญาณ ซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของสายนำสัญญาณ [2] โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายคุณลักษณะของเครือข่ายวงจรไมโครเวฟแบบสองทางหรือเน็ตเวิร์คแบบสองทาง (Two-port network) ซึ่งในรายงานวิจัยนี้จะใช้เน็ตเวิร์คและคุณสมบัติต่าง ๆ ไปใช้ในการทดลองเพื่อออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID โดยจะเริ่มจากพื้นฐานของ อิมพีแดนซ์และการแมทซิง คุณลักษณะของเน็ตเวิร์คสองทาง ฯลฯ

### 2.2.1 อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์ (Impedance and Reactance) [3]

#### อิมพีแดนซ์ (Impedance)

อิมพีแดนซ์ (สัญลักษณ์  $Z$ ) คือค่ารวมทั้งหมดที่ต้านกระแสในวงจร หรืออาจเรียกว่าเป็นสิ่งที่ทั้งหมดในวงจรที่ขวาง (impedes) การไหลของกระแส คล้ายกับความต้านทานแต่ก็ไม่เหมือนทีเดียว เพราะต้องคำนึงถึงผลกระทบของความจุและการเหนี่ยวนำด้วย อิมพีแดนซ์มีหน่วยวัดเป็น โอห์ม สัญลักษณ์คือ  $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

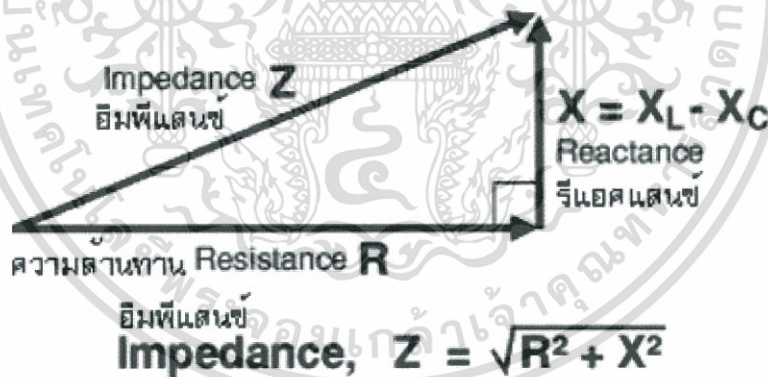
$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

อิมพีแดนซ์มีความซับซ้อนมากกว่าความต้านทาน เพราะหากความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านวงจรเปลี่ยนแปลง จะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวความจุและตัวเหนี่ยวนำ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า อิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ แต่การเปลี่ยนแปลงความถี่จะไม่มีผลกระทบต่อตัวต้านทานแต่อย่างใด คำว่า 'อิมพีแดนซ์' มักถูกใช้บ่อยกับวงจรง่ายๆ ซึ่งไม่มีตัวความจุหรือความเหนี่ยวนำ (ซึ่งก็ไม่ผิดอะไร) ตัวอย่างเช่น เมื่อกล่าวถึง “อินพุตอิมพีแดนซ์” หรือ “เอาต์พุตอิมพีแดนซ์” ของวงจร ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความสับสนสำหรับผู้เริ่มศึกษาอิเล็กทรอนิกส์แต่ก็ให้นึกเสียว่าอิมพีแดนซ์เป็นเพียงอีกคำหนึ่งที่เรียกความต้านทานที่มีปริมาณทางไฟฟ้าสี่ตัวที่เป็นสิ่งกำหนดอิมพีแดนซ์ (Z) ของวงจรคือ ความต้านทาน (R), ความจุ (C), ความเหนี่ยวนำ (L) และ ความถี่ (f).

อิมพีแดนซ์สามารถแยกเป็นสองส่วนคือ :

- ความต้านทาน R (เป็นส่วนที่คงที่โดยไม่คำนึงถึงความถี่)
- รีแอกแตนซ์ X (เป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ เนื่องจากความจุและความเหนี่ยวนำ)

ความจุและความเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนเฟส (phase shift) ระหว่างกระแสและแรงดัน ทำให้ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ไม่สามารถรวมกันเป็นอิมพีแดนซ์ด้วย วิธีง่ายๆ โดยต้องรวมกันทางเวกเตอร์ ซึ่งรีแอกแตนซ์จะตั้งฉากกับความต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์

### รีแอกแตนซ์ (Reactance)

รีแอกแตนซ์ (สัญลักษณ์ X) เป็นค่าตัวที่ต้านกระแสของความจุและความเหนี่ยวนำ ค่ารีแอกแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า และมีหน่วยการวัดเป็นโอห์ม สัญลักษณ์ Ω รีแอกแตนซ์มีสองชนิดคือ รีแอกแตนซ์ความจุ ( $X_C$ ) และรีแอกแตนซ์ความเหนี่ยวนำ ( $X_L$ )

รีแอกแตนซ์ทั้งหมด (X) คือผลต่างระหว่างรีแอกแตนซ์ทั้งสองคือ:  $X = X_L - X_C$  (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีแอกแตนซ์ความจุ  $X_C$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$X_C$  = รีแอกแตนซ์มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

$f$  = ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

$C$  = ความจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)

$X_C$  มีค่ามากที่ความถี่ต่ำและค่าน้อยที่ความถี่สูงสำหรับดีซีคงที่ซึ่งความถี่เป็นศูนย์  $X_C$  มีค่าเป็นอนันต์ (ความต้านทั้งหมด) เป็นที่มาของกฎที่ว่า ตัวเก็บประจุยอมให้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ผ่านแต่ปิดกั้นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

- ตัวอย่างเช่น: ตัวเก็บประจุขนาด  $1 \mu\text{F}$  มีค่ารีแอกแตนซ์  $3.2 \text{ k}\Omega$  ที่สัญญาณความถี่  $50 \text{ Hz}$  แต่เมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นเป็น  $10 \text{ kHz}$  รีแอกแตนซ์จะเหลือเพียง  $16 \Omega$

รีแอกแตนซ์ความเหนี่ยวนำ  $X_L$

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.4)$$

เมื่อ

$X_L$  = รีแอกแตนซ์มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

$f$  = ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

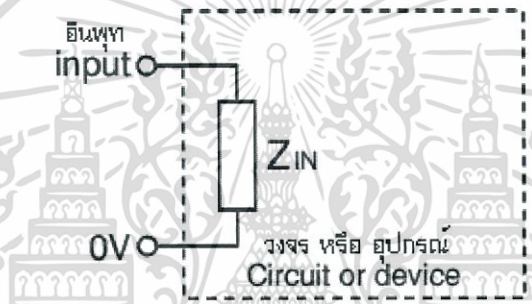
$L$  = ความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

$X_L$  มีค่าน้อยที่ความถี่ต่ำและค่ามากที่ความถี่สูงสำหรับกระแสตรงคงที่ซึ่งความถี่เป็นศูนย์  $X_L$  มีค่าเป็นศูนย์ (ไม่มีความต้าน) เป็นที่มาของกฎที่ว่า ตัวเหนี่ยวนำยอมให้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ผ่านแต่ปิดกั้นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ความถี่สูง

- ตัวอย่างเช่น: ตัวเหนี่ยวนำค่า  $1 \text{ mH}$  มีรีแอกแตนซ์เพียง  $0.3 \Omega$  ที่สัญญาณความถี่  $50 \text{ Hz}$  แต่เมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นเป็น  $10 \text{ kHz}$  รีแอกแตนซ์จะเป็น  $63 \Omega$

## อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{IN}$ )

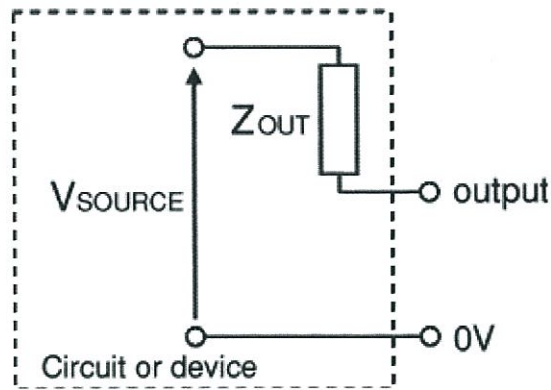
อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{IN}$ ) เป็นอิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปโดยสิ่งที่ต่อกับอินพุตของวงจรหรืออุปกรณ์ (เช่นเครื่องขยาย) อินพุตอิมพีแดนซ์เป็นผลรวมทั้งหมดของความต้านทาน ความจุและความเหนี่ยวนำ ซึ่งต่อกับอินพุตด้านในของวงจร หรืออุปกรณ์โดยปกติเราจะใช้คำว่า “อินพุตอิมพีแดนซ์” เป็นกรณีทั่วไปแม้ว่าจะมีแต่ความต้านทานในวงจร และก็สามารถใช้คำว่า “ความต้านทานอินพุต” แทนได้ ซึ่งความจริงก็สมเหตุสมผลถ้าที่จะเข้าใจว่า อินพุตอิมพีแดนซ์ก็เป็นเพียงความต้านทานที่สัญญาณอินพุตมีความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 1 kHz) การที่ความถี่มีผลต่อความจุและความเหนี่ยวนำ จึงทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยทั่วไป ผลต่อความจุและความเหนี่ยวนำจะมีความสำคัญที่สุด ที่ความถี่สูงๆปกติ อินพุตอิมพีแดนซ์จะต้องสูง อย่างน้อยเป็นสิบเท่าของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจร (หรืออุปกรณ์) ที่ป้อนสัญญาณเข้าอินพุต ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าอินพุตไม่โอเวอร์โหลดแหล่งกำเนิดสัญญาณซึ่งจะทำให้ขนาดสัญญาณถูกลดลง



รูปที่ 2.12 อินพุตอิมพีแดนซ์

## เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{OUT}$ )

เอาต์พุตของวงจรหรืออุปกรณ์เทียบได้กับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{OUT}$ ) อนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน ( $V_{SOURCE}$ ) ซึ่งเรา เรียกว่าวงจรสมมูล (equivalent circuit) และมันแสดงแทน ผลรวมทั้งหมดของ แหล่งกำเนิดแรงดัน ความต้านทาน ความจุ และความเหนี่ยวนำ ที่ต่อกับเอาต์พุตภายในวงจรหรืออุปกรณ์ และพึงรู้ว่า  $V_{SOURCE}$  ไม่ใช่แหล่งจ่ายไฟ  $V_S$  โดยปกติเราจะใช้คำว่า “เอาต์พุตอิมพีแดนซ์” เป็นกรณีทั่วไปแม้ว่าจะมีแต่ความต้านทานในวงจรและก็สามารถใช้คำว่า “ความต้านทานเอาต์พุต” แทนได้ ซึ่งความจริงก็สมเหตุสมผลที่จะเข้าใจว่า เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ก็เป็นเพียงความต้านทานที่สัญญาณเอาต์พุตมีความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 1 kHz) การที่ความถี่มีผลต่อความจุและความเหนี่ยวนำ จึงทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยทั่วไป ผลต่อความจุและความเหนี่ยวนำจะมีความสำคัญที่สุด ที่ความถี่สูงๆ ปกติเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าต่ำ คือน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต่อกับเอาต์พุตเป็นสิบเท่าหากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ค่อนข้างสูงมันจะไม่สามารถป้อนสัญญาณที่แรงเพียงพอให้โหลด เพราะแรงดันของสัญญาณจะสูญเสียมากภายในวงจรขับเคลื่อนเอาต์พุตอิมพีแดนซ์  $Z_{OUT}$  ตัวโหลดสามารถเป็นอุปกรณ์เดี่ยวหรืออินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรอื่นก็ได้



รูปที่ 2.13 เอาต์พุตอิมพีแดนซ์

ลักษณะของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และโหลดสามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณีคือ

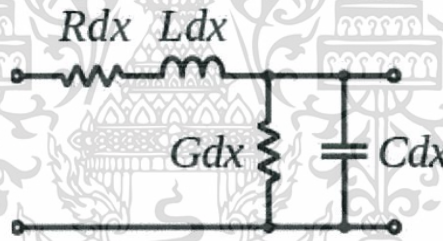
- เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า  $Z_{OUT} \ll Z_{LOAD}$   
 $V_{SOURCE}$  ส่วนใหญ่จะปรากฏคร่อมโหลด จะมีการสูญเสียแรงดันขับเคลื่อนผ่านเอาต์พุตอิมพีแดนซ์น้อยมาก ปกติวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุด
- เอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงกว่า  $Z_{OUT} \gg Z_{LOAD}$   
 มีเพียงส่วนน้อยที่ปรากฏคร่อมโหลดแทบทั้งหมดจะสูญเสียในการขับเคลื่อนผ่านเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ วิธีนี้ไม่เป็นที่น่าพอใจ
- อิมพีแดนซ์เข้าคู่กัน  $Z_{OUT} = Z_{LOAD}$   
 ครึ่งหนึ่งของ  $V_{SOURCE}$  ปรากฏคร่อมโหลด และอีกครึ่งหนึ่งสูญเสียในการขับเคลื่อนผ่านเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ วิธีนี้มีประโยชน์ในบางสถานการณ์ (เช่นอย่างเครื่องขยายเสียงขับลำโพง) เพราะมันสามารถส่งกำลังงานสูงสุดไปยังโหลด แต่พึงระลึกว่ากำลังงานอีกครึ่งหนึ่งต้องสูญเสียไปกับการขับเคลื่อนผ่าน  $Z_{OUT}$  ทำให้มีประสิทธิภาพเพียง 50%

ซึ่งในการออกแบบสายอากาศสำหรับโครงการนี้จะสนใจการแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างเครื่องอ่าน RFID กับสายอากาศเพื่อให้เครื่องอ่านส่งกำลังไปที่สายอากาศทำให้ประสิทธิภาพการอ่านแท็กได้ดีขึ้นและไกลขึ้นลดการสูญเสียภายใน

## 2.2.2 อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ (Transmission Line's Characteristic Impedance)

โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น รีซิสเตอร์, ตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุ เราสามารถมองเห็นอุปกรณ์เหล่านี้ได้ จับต้องได้ และสามารถวัดด้วยเครื่องมือทางไฟฟ้า เช่น แหล่งจ่ายสัญญาณ ออสซิลโลสโคป แล้วใช้ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมโหนด, กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหนด, และความต่างเฟสระหว่างศักย์และกระแสไฟฟ้านั้นมารวมคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบไปด้วย รีซิสแตนซ์และรีแอคแตนซ์ได้ง่าย แต่สำหรับเรื่อง “อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ (Transmission Line's Characteristic Impedance เขียนสัญลักษณ์ว่า  $Z_0$ )” เราไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้ามาวัดค่าได้ตรง ๆ แต่จะต้องวัดทางอ้อมถึงสิ่งที่สายนำสัญญาณนั้นทำให้เกิดขึ้น แล้วคำนวณกลับเอาว่าสายนำสัญญาณมีค่า  $Z_0$  เป็นเท่าไร

อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ จะมีค่าประจำตัวของสายนำสัญญาณ ไม่ว่าเราจะตัดมันเป็นท่อนสั้นหรือยาวแค่ไหน ใช้กับความถี่เท่าไร หรือใช้กำลังส่งมากหรือน้อยแค่ไหน (ต้องอยู่ในช่วงที่ถูกออกแบบเอาไว้ให้ทำงาน) ตัวสายนำสัญญาณจะมีอิมพีแดนซ์จำเพาะคงเดิมเสมอ เมื่อมองสายนำสัญญาณที่สมมติว่าไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อทำการจ่ายคลื่นเข้าไปจากฝั่งหนึ่งของสายไปยังอีกฝั่งของสายนำสัญญาณ (สายนำสัญญาณมีความยาวเป็นอนันต์) พิจารณาในส่วนสั้น ๆ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนผังของสายนำสัญญาณที่ไม่มีการสูญเสียเมื่อพิจารณาที่ความยาวสั้น ๆ

จะได้สมการอธิบายโดยอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.5)$$

โดยที่

R เป็นความต้านทานของตัวนำทั้งสองต่ออนุกรมกันอยู่ต่อหน่วยความยาว ( $\Omega/m$ )

L เป็นความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว (Henry/m)

G เป็นความนำไฟฟ้าของส่วนที่เป็นฉนวนระหว่างตัวนำทั้งสองต่อหน่วยความยาว (Mho/m)

C เป็นความเก็บประจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสองต่อหน่วยความยาว (Farad/m)

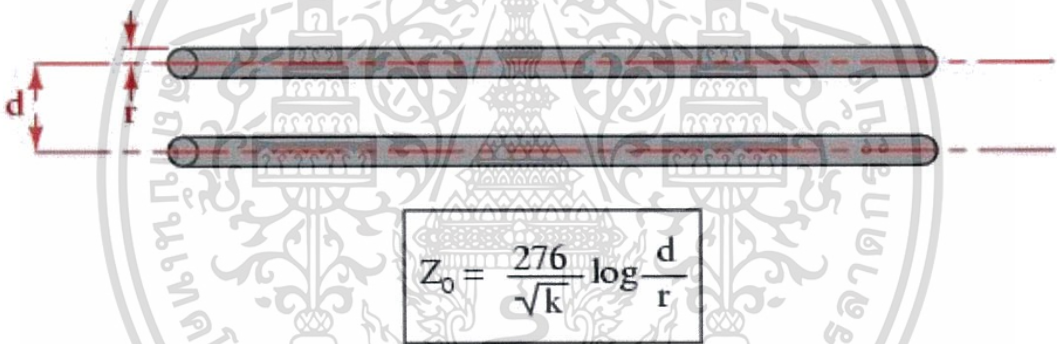
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$j$  แสดงการเป็นจำนวนจินตภาพทางคณิตศาสตร์  
 $w$  เป็นความเร็วเชิงมุม (rad/s)  
 และ  $dx$  ในภาพแสดงถึงความยาวสั้น ๆ ของสายนำสัญญาณ

สำหรับสายนำสัญญาณในอุดมคติ (แม้ว่าของจริงไม่ใช่แบบในอุดมคติแต่ก็ถือว่าใกล้เคียงมาก) จะถือว่าทำจากตัวนำสมบูรณ์และนำกระแสได้ดีมากจนไม่มีการสูญเสียไปเป็นความร้อน (ทำให้  $R = 0$ ) และมีฉนวนระหว่างตัวนำของสายนำสัญญาณแบบสมบูรณ์จนไม่มีการไหลลัดวงจรระหว่างกันเลย (ทำให้  $G = 0$ ) อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณจะเป็น

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.6)$$

จะเห็นว่าเนื่องจาก  $L, C$  เป็นค่า "ต่อหน่วยความยาว" ทั้งสิ้น ทำให้ความต้านทานจำเพาะของสายนำสัญญาณในอุดมคตินี้ไม่ขึ้นอยู่กับความยาว และเป็นเลขจำนวนจริง (คือไม่มีรีแอกแตนซ์) โดยที่  $L$  กับ  $C$  ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของสายนำสัญญาณนั้น ๆ



รูปที่ 2.15 อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณแบบ twin-lead

โดยที่

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ ( $\Omega$ )

$d$  คือ ระยะระหว่างแกนกลางทั้งสองของตัวนำ ในหน่วยเดียวกับ  $r$

$r$  คือ รัศมีของตัวนำ ในหน่วยเดียวกับ  $d$

$k$  คือ relative permittivity (บอกว่าเป็นแม่เหล็กเท่าใดเมื่อเทียบกับความเป็นแม่เหล็กของสุญญากาศ) ของฉนวนระหว่างตัวนำทั้งสอง (เป็นค่าสัมพัทธ์จึงไม่มีหน่วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log \frac{d_1}{d_2}$$

รูปที่ 2.16 อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณแบบ Coaxial

โดยที่

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ ( $\Omega$ )

$d_1$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของตัวนำด้านนอก (ส่วนชีลด์) ในหน่วยเดียวกับ  $d_2$

$d_2$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของตัวนำด้านใน (ส่วนแกน) ในหน่วยเดียวกับ  $d_1$

$k$  คือ relative permittivity (บอกว่ามีค่าเป็นแม่เหล็กเท่าใดเมื่อเทียบกับความเป็นแม่เหล็กของสุญญากาศ) ของฉนวนระหว่างตัวนำทั้งสอง (เป็นค่าสัมพัทธ์จึงไม่มีหน่วย)

ดังนั้นเราจะเห็นว่า เราสามารถสร้างสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์จำเพาะเท่าไรก็ได้ ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะนี้สำคัญมาก ๆ ที่เราต้องทราบ ไม่ใช่เพียงแต่เราต้องเลือกให้ถูกต้องกับโหลดที่เราทำงานด้วยเท่านั้น แต่มันยังมีผลในการแปลงอิมพีแดนซ์ที่มาต่ออยู่กับตัวมันได้อีกด้วย

ถ้าพิจารณาสายนำสัญญาณที่มีการสูญเสีย (ในความเป็นจริง) จะมีการสูญเสียจากความต้านทานต่อหน่วยความยาว ( $R$ ) ที่ไม่ใช่  $0 \Omega$ , ความนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว ( $G$ ) ที่ไม่ใช่  $0 \text{ mho}$ , ความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว ( $L$ ), และความเก็บประจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว ( $C$ ) ทำให้เราสามารถคำนวณ "ค่าคงตัวของการแพร่กระจายคลื่น ( $\gamma$  - gamma, แกมมา) ได้เป็น

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.7)$$

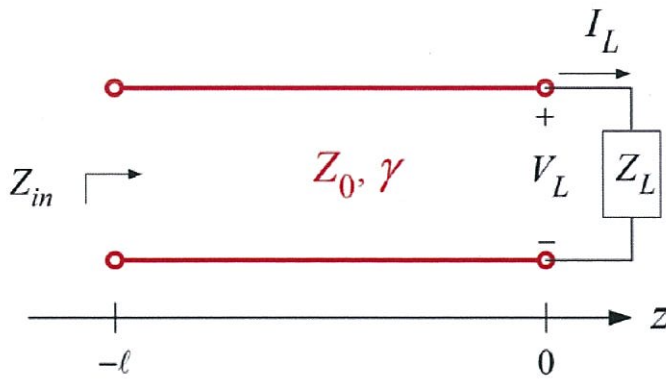
โดย  $\gamma$  เป็นค่าคงตัวของการแพร่กระจายคลื่น (Complex propagation constant)

$\alpha$  เป็นส่วนที่เป็นจำนวนจริงซึ่งคือค่าคงตัวของ การลดทอน (attenuation constant)

ใน หน่วย Np/m (นีเปอร์ต่อเมตร)

$\beta$  เป็นค่าคงตัวทางเฟส (phase constant) ในหน่วย rad/m (เรเดียนต่อเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แผนผังการต่อสายส่งสัญญาณแบบมีการสูญเสียกับโหลดอิมพีแดนซ์

และมีค่าการสะท้อนกลับ ( Voltage reflection coefficient )

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.8)$$

โดย

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ ( $\Omega$ )

$Z_L$  คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต่อกับสายนำสัญญาณ

$\Gamma$  คือ ค่าการสะท้อนกลับ ( Voltage reflection coefficient )

และมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์  $Z_{in} = Z_0 \left( \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \right)$  (2.9)

### 2.2.3 อิมพีแดนซ์แมทซิง (Impedance matching) [4]

เนื่องจากเครื่องอ่าน RFID ประกอบไปด้วยสายอากาศที่ใช้สำหรับอ่านแท็กและส่วนที่ส่งกำลังไปยังสายอากาศโดยเชื่อมต่อทางสายนำสัญญาณ ในการใช้งานถ้าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกับตัวส่งกำลังหรือแหล่งจ่ายไม่เท่ากันจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น การสะท้อนกลับจะทำให้เกิดการสูญเสีย การส่งผ่านกำลังต่ำลงและทำให้เกิดคลื่นนิ่งในสายนำสัญญาณและเกิดความร้อนจนอาจทำให้สายนำสัญญาณและเครื่องส่งเสียหายได้ เมื่อทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ตรงกับอิมพีแดนซ์ของสายส่งแล้วจะทำให้เครื่องส่งส่งกำลังได้มากที่สุดเป็นผลให้การรับส่งข้อมูลดีขึ้น โดยวิธีการแมทซิงอิมพีแดนซ์มีดังนี้

### 1. ใช้ตัวต้านทาน

การใช้ตัวต้านทานมีข้อดีคือ ง่าย แต่เนื่องจากความต้านทานจะเปลี่ยนกระแสที่ไหลผ่านตัวมันไปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่ง จึงไม่เป็นที่นิยมในการแมทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และสิ่งหนึ่งที่ใช้ความต้านทานไม่สามารถแก้ไขได้คือหากโหลดมีส่วนของรีแอคแตนซ์ปนอยู่ด้วย ( $\pm jX \Omega$ ) วิธีนี้จะไม่สามารถทำให้รีแอคแตนซ์กลายเป็น  $+j0 \Omega$  ได้

### 2. ใช้หม้อแปลง

เราสามารถใช้อัตราการผันขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) และทุติยภูมิ (Secondary) ไม่เท่ากันในการเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ได้ โดย  $Z_{in} = n^2 \times Z_{load}$  เมื่อ  $n$  เป็นอัตราส่วนของจำนวนรอบการผันขดลวด ด้านที่พันมากกว่าจะต่อกับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า ข้อดีของวิธีนี้คือ ง่าย โดยข้อเสียคือทำงานได้ไม่ดีหรือมีการสูญเสียมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น

### 3. การนำสายนำสัญญาณมาต่อกัน

คือการสร้างสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์  $100 + j0 \Omega$  จำนวน 2 ต้น แล้วนำมาต่อขนานเข้าด้วยกัน ก็จะได้อิมพีแดนซ์ที่จุดป้อนเป็น  $50 + j0 \Omega$  ได้ เราอาจจะเห็นการทำแบบนี้ได้ในการต่อสายอากาศแบบโพลเด็คโพลสองตัวเข้าด้วยกัน (โดยต้องระวังให้สายนำสัญญาณที่ต่อจากสายอากาศมามีความยาวถูกต้องด้วย คือเป็น 0.5 หรือ 1 หรือ 1.5 หรืออื่น ๆ ที่เป็นจำนวนเท่าของครึ่งคลื่น (เป็นความยาวทางไฟฟ้า คือต้องคิดตัวคูณความเร็วของคลื่นในสายนำสัญญาณด้วย สายนำสัญญาณตรงนี้จะใช้แบบ 50 หรือ 75  $\Omega$  ก็ได้) เพื่อไม่ให้ส่วนของสายนำสัญญาณนั้นไปแปลงอิมพีแดนซ์  $100 + j0 \Omega$  นั้นไปเป็นอย่างอื่นเสียก่อนที่จะถูกนำมาต่อขนานเข้าด้วยกัน (ในความเป็นจริง อาจจะทำต่ออนุกรมกันก็ได้ เช่น นำสายอากาศสองต้นที่แต่ละต้นมีอิมพีแดนซ์  $25 + j0 \Omega$  มาต่ออนุกรมกันให้เป็น  $50 + j0 \Omega$  ก็ได้) โดยในการต่อไม่ว่าจะแบบขนานหรืออนุกรมจะต้องคำนึงถึงการเสริม/หักล้างกันของเฟสของคลื่นด้วย

### 4. ใช้สายนำสัญญาณช่วยในการแมทซิง

ในหลายกรณี เราสามารถออกแบบสายอากาศให้มีความต้านทาน  $100 \Omega$  และใช้สายนำสัญญาณขนาด 75  $\Omega$  ตัดให้ได้ความยาวทางไฟฟ้าเป็น  $1/4$  หรือ  $3/4$  หรือ  $5/4$  (จำนวนคี่ของหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น - ความยาวทางไฟฟ้า คิดตัวคูณความเร็วด้วย) ความยาวคลื่น แล้วมาต่อเข้ากับสายอากาศนั้น เราเรียกสายนำสัญญาณท่อนสั้น ๆ นั้นว่า Quarter-wave transformer และจะได้ความต้านทานที่ปลายของ Quarter-wave transformer เป็น

$$Z_{in} \times Z_{load} = Z_0^2 \quad (2.10)$$

หรือ

$$Z_{in} = Z_0^2 / Z_{load} \quad (2.11)$$

โดย

$Z_{load}$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

$Z_{in}$  คือ อิมพีแดนซ์ที่ปลายของสายนำสัญญาณความยาว  $1/4$  ของความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณความยาว  $1/4$  ของความยาวคลื่น

เช่น การใช้สายนำสัญญาณ  $75 \Omega$  ตัดยาว  $1/4$  ความยาวคลื่น ต่อเข้ากับสายอากาศ อิมพีแดนซ์  $100 \Omega$  จะได้  $Z_{in} = 75^2 / 100 = 56$  โอห์ม โดยประมาณ

### 5. ใช้วงจร L, C (ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ)

แบบนี้เป็นแบบที่ใช้กันมากในสายอากาศหลายชนิด ข้อดีของการใช้วงจรที่ประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ "โดยไม่มีตัวความต้านทานมาเกี่ยวข้อง" คือ ไม่มีการสูญเสียพลังงาน (เป็น lossless matching circuit) เนื่องจากในทางทฤษฎีแล้วตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะไม่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมันออกไปเป็นพลังงานอื่นเช่น ความร้อน ผู้จัดทำจึงเลือกใช้วิธีนี้ในการออกแบบสายอากาศซึ่งจะพบในส่วนถัดไป

## 2.3 คุณลักษณะของเน็ตเวิร์คสองทาง (Two-port Network) [5][6]

เพื่อที่จะอธิบายพฤติกรรมของ Two-port Network เราจะต้องรู้ข้อมูลฟังก์ชันของเน็ตเวิร์คที่ใช้อธิบายเน็ตเวิร์คที่เราสนใจ เช่น พารามิเตอร์  $z, y, h, ABCD$  ซึ่งได้จากการวัด โดยสามารถทำได้ง่ายที่ความถี่ต่ำ แต่ในช่วงความถี่สูงนั้นการวัดพารามิเตอร์ดังกล่าวจะทำได้ไม่แม่นยำนักเนื่องจากต้องอาศัยการทดสอบด้วยการ short- และการ open-circuit ซึ่งทำได้ยากในช่วงความถี่ไมโครเวฟ

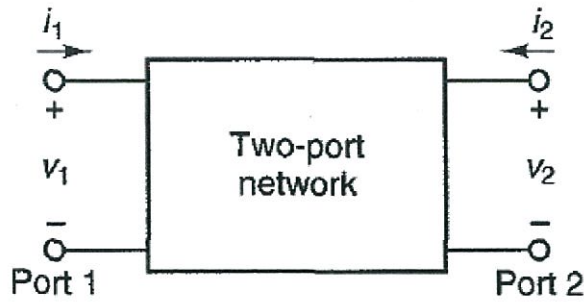
จึงมีการแก้ปัญหาโดยการใช้พารามิเตอร์ที่สามารถใช้ได้ดีในช่วงความถี่ไมโครเวฟ นั่นคือ  $s$  พารามิเตอร์ ( $s$  parameters) ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของ Two-port network ได้ง่ายกว่าและใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ. 1970 มีการใช้  $s$  พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เน็ตเวิร์คเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการวัด  $s$  พารามิเตอร์ทำได้ง่ายและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังกล่าวก็ทำได้ง่ายในการอธิบายคุณลักษณะของเน็ตเวิร์คสองทางและเน็ตเวิร์คหลายทาง

คลื่นกำลังและการใช้งานทั่วไปของ scattering parameters ( $s$  พารามิเตอร์) จะอธิบายในต่อไป

### 2.3.1 อิมพีแดนซ์, แอดมิตแตนซ์, ไฮบริดเมทริกซ์และ ABCD เมทริกซ์

เน็ตเวิร์คสองทางที่ความถี่ต่ำดังรูปที่ 2.11 สามารถแสดงลักษณะได้หลายแบบ โดยปกติที่นิยมกันทั่วไปคือแสดงในรูปอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ ( $z$  พารามิเตอร์), แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ ( $y$  พารามิเตอร์), ไฮบริดเมทริกซ์ ( $h$  พารามิเตอร์) และ ABCD เมทริกซ์ (ABCD พารามิเตอร์)



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างเน็ตเวิร์คสองทาง

โดยแสดงดังนี้

Z พารามิเตอร์:

$$V_1 = i_1 Z_{11} + i_2 Z_{12} \quad (2.12)$$

$$V_2 = i_1 Z_{21} + i_2 Z_{22} \quad (2.13)$$

เขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

y พารามิเตอร์:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

h พารามิเตอร์:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ABCD พารามิเตอร์:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงลักษณะของเน็ตเวิร์คสองทางตามแบบด้านบนใช้ได้ดีในช่วงความถี่ต่ำเพราะว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถวัดได้ง่ายด้วยใช้วิธีการ short และ open circuit ตัวอย่างเช่น การหาพารามิเตอร์  $z_{11}$  ทำโดยการ open circuit ที่พอร์ตที่สอง ( $i_2 = 0$ )

$$z_{11} = \frac{v_1}{i_1} \Big|_{i_2=0} \quad (2.18)$$

แต่ที่ความถี่ไมโครเวฟการวัด  $z, y, h$  หรือ ABCD พารามิเตอร์ทำได้ยากมากเพราะว่ามีข้อจำกัดในการทำ short และ open circuit ในไฟฟ้ากระแสสลับจึงทำให้ต้องมีวิธีใหม่ที่จะใช้อธิบายเน็ตเวิร์คสองทางที่ความถี่ไมโครเวฟโดยกำหนดจากการเคลื่อนที่ของคลื่น เรียกว่า scattering matrix (s พารามิเตอร์)

### 2.3.2 สแกตเตอร์ริงเมทริกซ์ (scattering matrix) และ s พารามิเตอร์

ในทางปฏิบัติค่าที่วัดได้ของเน็ตเวิร์คจะอยู่ในรูปแบบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซึ่งทำโดยการป้อนกำลังคลื่นเข้าทางพอร์ตหนึ่งแล้ววัดกำลังคลื่นที่ออกไปทางพอร์ตที่เหลือซึ่งการวัดดังกล่าวทำได้ง่ายและให้ผลที่ชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถวัดได้ทั้งขนาดและเฟสของของคลื่นเมื่อเทียบกับคลื่นที่ผ่านเข้ามา จึงได้มีการนิยามพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่ส่งผ่าน  $V^+(x)$  กับคลื่นที่สะท้อนกลับหรือคลื่นที่ส่งผ่าน  $V_n^-$  โดยที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนคือ  $\Gamma$  ซึ่ง

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} \quad (2.19)$$

เมื่อพิจารณาเน็ตเวิร์คสองทางถ้ามีคลื่นส่งเข้ามาจากพอร์ตที่ 1 ก็จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็น  $V_1^- = \Gamma V_1^+$

นอร์มอลไลต์ด้วยอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายนำสัญญาณ  $z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$  (2.20)

และกำหนดให้  $V^+$  และ  $V^-$  ที่นอร์มอลไลต์และเป็น a และ b ตามลำดับจะได้ว่า  $b = sa$  และเขียนความสัมพันธ์ในรูปเมทริกซ์สำหรับเน็ตเวิร์คสองทางได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

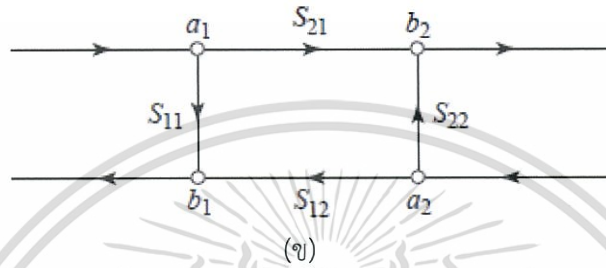
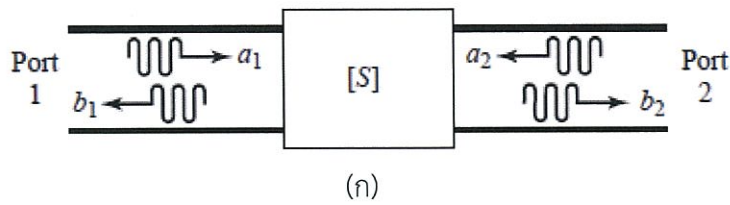
และมีความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $\Gamma$  และ s พารามิเตอร์ของเน็ตเวิร์คสองทางดังสมการ

$$\Gamma = s_{11} - \frac{s_{11}s_{12}}{1+s_{22}} \quad (2.22)$$

โดย

$s_{11}$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากพอร์ตที่ 1 มายังพอร์ตที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $S_{12}$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากพอร์ตที่ 2 มายังพอร์ตที่ 1  
 $S_{21}$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากพอร์ตที่ 1 มายังพอร์ตที่ 2  
 $S_{22}$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากพอร์ตที่ 2 มายังพอร์ตที่ 2



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงการไหลของสัญญาณของเน็ตเวิร์คสองทาง (ก) แสดงคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน (ข) กราฟการไหลของสัญญาณ

## 2.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กพื้นฐานของสารเฟอร์ไรต์ [7][8]

สารเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มีคุณสมบัติเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น  $MFe_2O_4$  โดยที่ธาตุ M คือโลหะประเภทไดวาเลนต์ (Divalent) เช่น Mg, Mn, Fe, Co, Ni และ Cu เป็นต้น สารเฟอร์ไรต์มีคุณสมบัติพิเศษในย่านความถี่ไมโครเวฟเพราะว่าสารเฟอร์ไรต์นั้นมีความต้านทานจำเพาะสูงคือประมาณ  $10^6 - 10^8 \Omega\text{-cm}$  ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สารเฟอร์ไรต์และส่งผ่านไปตามสารเฟอร์ไรต์ได้ การเกิดคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติกนั้นเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน เมื่อพิจารณาทฤษฎีพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระบุไว้ว่าสนามไฟฟ้านั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากประจุไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กจะกำเนิดมาจากกระแสแบบต่าง ๆ ซึ่งการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนในสารเฟอร์โรแมกเนติกจะทำให้เกิดกระแสวงกลมเล็ก ๆ ไหลในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเป็นต้นกำเนิดของสนามแม่เหล็กโดยมีทิศทางตามกฎมือขวา คือกระแสไหลตามการกำนั้วมือทั้งสี่และสนามแม่เหล็กพุ่งออกทางนิ้วหัวแม่มือ โดยในภาวะปกติที่สารเฟอร์โรแมกเนติกจะไม่มีผลของสนามแม่เหล็กเนื่องจากการวางตัวของอิเล็กตรอนเป็นไปอย่างไม่มีระเบียบทำให้ขั้วแม่เหล็กภายในหักล้างกันหมด แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำขั้วแม่เหล็กจะพยายามเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งทำให้สารเฟอร์โรแมกเนติกแสดงอำนาจแม่เหล็กออกมา[2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การเกิดสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กอาจเกิดขึ้นได้จากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าหรือในทางกลศาสตร์ควอนตัม นั้นเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนซึ่งการหมุนรอบตัวเองนี้เป็นที่มาของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรต่าง ๆ โดยการสร้างสนามแม่เหล็กจากภายนอกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength) ซึ่งได้จากการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด solenoid ได้ดังสมการ ดังนี้

$$H = \frac{NI}{l} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $H$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength) (A/m)

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

$I$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวด (A)

$l$  คือ ความยาวของขดลวด (m)

### 2.4.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction หรือ Magnetic flux density)

เมื่อทำการนำแท่งเหล็กใส่ลงในขดลวด solenoid ที่มีกระแสไหลผ่านจะพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายนอกขดลวดมีความเข้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กถูกทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็ก (Magnetization) ภายในขดลวด ความเข้มของสนามแม่เหล็กใหม่ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength,  $H$ ) ที่เกิดขึ้นจากขดลวด solenoid และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งเหล็กถูกทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็ก (Magnetization) ภายในขดลวด โดยจะเกิดโมเมนต์ของแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นเรียกว่า สภาวะแม่เหล็ก (Intensity of magnetization,  $M$ ) โดยสนามแม่เหล็กใหม่ที่เกิดขึ้นเรียกว่า Magnetic induction :  $B$  มีหน่วยเป็น Teslas หรือ webers per square meter ( $\text{Wb/m}^2$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  แสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.24)$$

เมื่อ  $B$  คือ Magnetic induction หรือ Magnetic flux density (Teslas, T)

$\mu_0$  คือ ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของสุญญากาศ (permeability of free space) =  $1.257 \times 10^{-6}$  H/m

$H$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)

$M$  คือ Magnetization (A/m)

และเมื่อนำวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกไปวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กนั้นมีความเข้มเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของสารนั้น ๆ จากสมการที่...ซึ่งวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีค่า  $H$  มากกว่าค่า  $M$  มาก ๆ จึงประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  ภายในวัสดุได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \mu H \quad (2.25)$$

เมื่อ B คือ Magnetic induction หรือ Magnetic flux density (Teslas, T)  
 H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)  
 $\mu$  คือ ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของวัสดุ (Magnetic permeability of material)

และมีการนิยามค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability,  $\mu_r$ )  
 ดังนี้

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\mu_r$  คือ การซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability)  
 $\mu$  คือ ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของวัสดุ (Magnetic permeability of material)  
 $\mu_0$  คือ ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของสุญญากาศ (permeability of free space) =  $1.257 \times 10^{-6}$  H/m

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษาสายอากาศสำหรับตัวอ่าน RFID แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ส่วนแรก คือ การทำอิมพีแดนซ์แมทชิงของสายอากาศแบบ Single ended เข้ากับตัวส่งที่ความถี่ต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบทฤษฎีที่ใช้และดูความสามารถในการแมทชิงสายอากาศกับตัวส่ง เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการจำลองวงจรไมโครเวฟด้วยโปรแกรม Advanced Design System (ADS) และทำการเปลี่ยนสายอากาศโดยทำการเพิ่มสารเฟอร์ไรต์เข้าไปที่สายอากาศเดิมและวัดความสามารถในการแมทชิงอิมพีแดนซ์ ส่วนต่อมาคือ การทำการจำลองสนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมาจากสายอากาศธรรมดาและสายอากาศที่ทำการเพิ่มสารเฟอร์ไรต์เพื่อเปรียบเทียบความแรงและรูปแบบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กระหว่างสายอากาศสองชนิดด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell และส่วนสุดท้ายคือการออกแบบสายอากาศโดยใช้แผ่นเฟอร์ไรต์ติดเข้ากับสายอากาศและทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์เข้ากับเครื่องอ่าน RFID และทดสอบการใช้งาน

#### 3.1 การทำอิมพีแดนซ์แมทชิงของสายอากาศเข้ากับตัวส่งที่ความถี่ต่าง ๆ

ในส่วนนี้เป็นการทำการทดลองทำแมทชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ต่าง ๆ และวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $\Gamma$  หรือ  $s_{11}$  (S parameter) ของสายอากาศทั้งแบบธรรมดาและแบบที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์ติดอยู่ที่ด้านล่างเพื่อตรวจสอบดูว่าสายอากาศจะสามารถส่งผ่านพลังงานได้สูงสุดที่ความถี่ที่ต้องการได้หรือไม่ (ขนาดของค่า  $s_{11}$  ที่ความถี่นั้น ๆ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความถี่อื่น) โดยจะเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการวัด 3 วิธีคือ

1. จากการวัดสายอากาศที่มีแมทชิงเน็ตเวิร์คโดยตรง
2. จากการวัดสายอากาศแยกกับแมทชิงเน็ตเวิร์คแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ทั้งสองมารวมกันตามทฤษฎีไมโครเวฟ
3. สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Advanced Design System

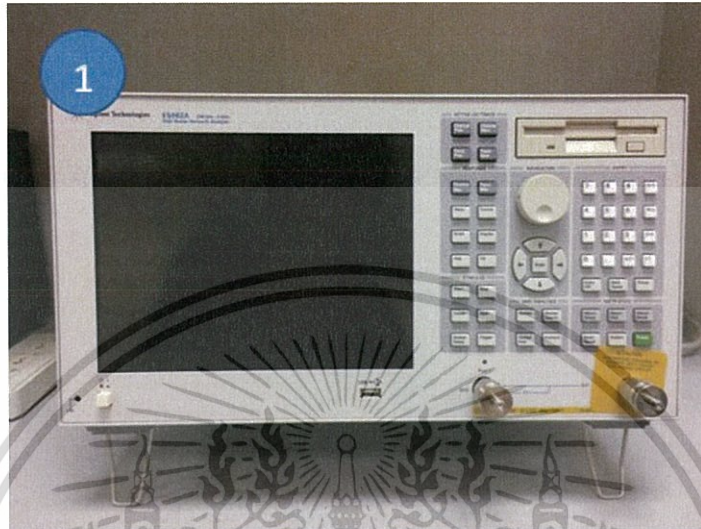
ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากทั้ง 3 วิธีมีค่าสอดคล้องไปในทางเดียวกันแสดงว่าวิธีในการจำลองและการคำนวณทางทฤษฎีนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศในการทดลองถัดไปได้

##### 3.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. E5062A ENA-L RF Network Analyzer
2. สายโคแอกเซียล
3. หัวเชื่อมต่อ SMA
4. สายอากาศบนแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แมทซิงเน็ตเวิร์คบนแผ่น PCB
6. สายอากาศกับแมทซิงเน็ตเวิร์คบน PCB
7. แผ่นสติกเกอร์เฟอร์ไรต์
8. แผ่น PCB เปล่า ขนาด 4 x 3.8 เซนติเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร

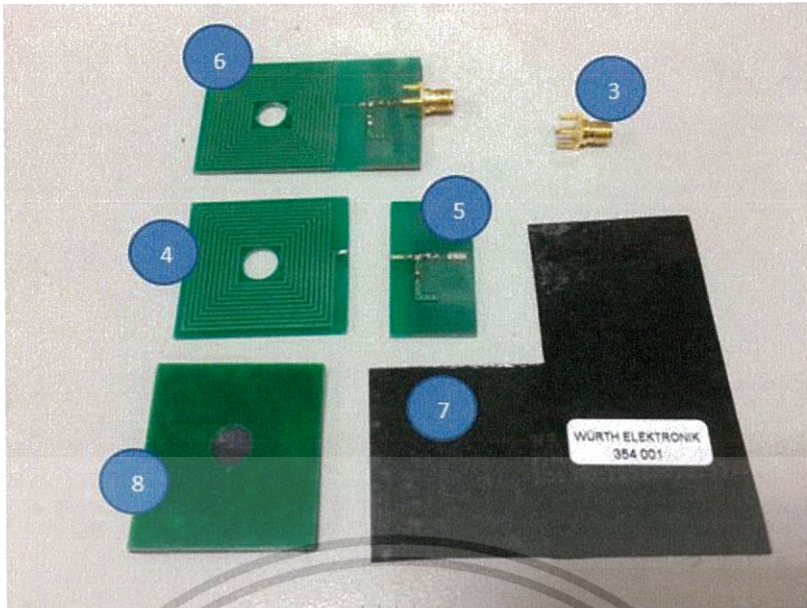


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

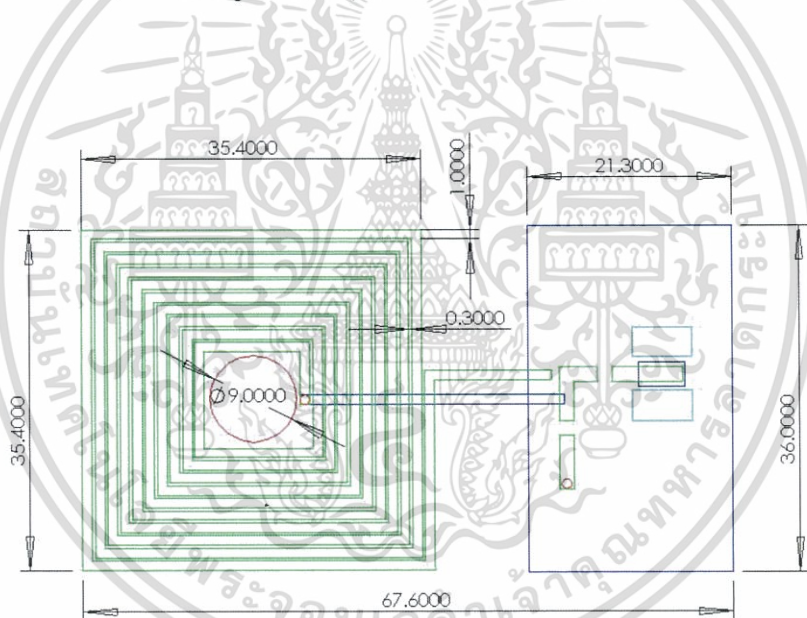


รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ)



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร

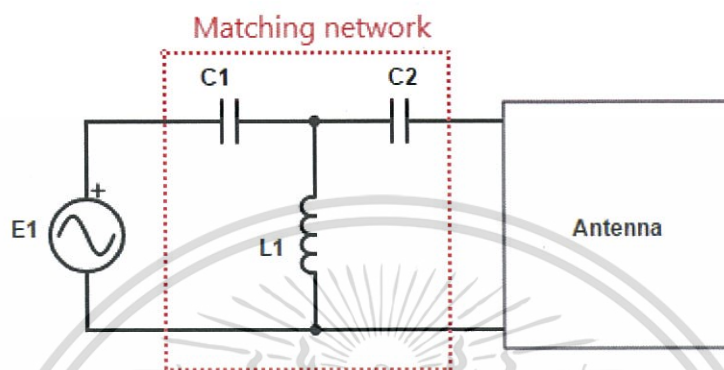
### 3.1.2 แมทชิงเน็ตเวิร์ค

ในการทดลองนี้จะใช้แมทชิงเน็ตเวิร์คที่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมาเป็นวงจรในการทำแมทชิงอิมพีแดนซ์ระหว่างสายตัวส่งกำลัง (Network Analyzer) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  เพื่อให้การส่งพลังงานจากแหล่งจ่ายไปที่สายอากาศมีค่าสูงสุด ข้อดีของการใช้วงจรแมทชิงเน็ตเวิร์คที่ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ "โดยไม่มีตัวความต้านทานมาเกี่ยวข้อง" คือ ไม่มีการสูญเสียพลังงาน (เป็น lossless matching circuit) เนื่องจากในทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะไม่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมันออกไปเป็นพลังงานอื่น เช่น ความร้อน

ในการทำแมทชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความถี่ใช้งานที่ เพราะว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเปลี่ยนไปตามความถี่จึงทำให้แมทชิงอิมพีแดนซ์ทำได้ที่ ค่าความถี่ใดความถี่หนึ่งที่เราสนใจโดยจะเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) ซึ่งได้ออกแบบไว้เพื่อใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของแมทชิงเน็ตเวิร์ค

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถี่ที่ใช้ในการแมทชิงอิมพีแดนซ์และค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรแมทชิง

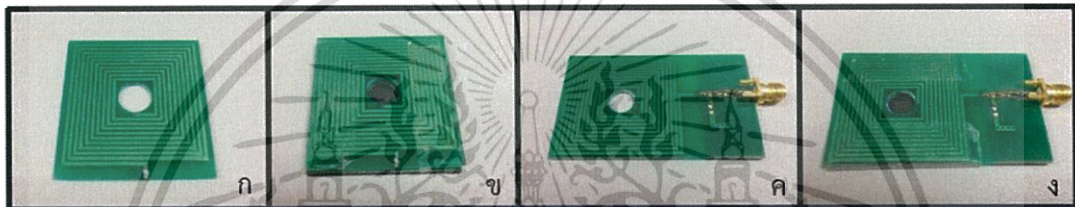
Type	Resonance Freq.(MHz)	Matching Network (สายอากาศธรรมดา)				Matching Network (สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์)			
		$Z_{ant}$ Resonance ( $\Omega$ )	C1 (pF)	L1 (nH)	C2 (pF)	$Z_{ant}$ Resonance ( $\Omega$ )	C1 (pF)	L1 (nH)	C2 (pF)
1	14.4	$15.117 + j286.68$	82	470	33	$25.689 + j321.808$	68	820	25
2	198.5	$16.312 - j157.834$	2.4	100	22	$31.326 - j170.315$	3	100	15
3	324	$17.44 - j68.582$	1.8	47	6.8	$32.912 - j105.793$	2.4	47	8.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

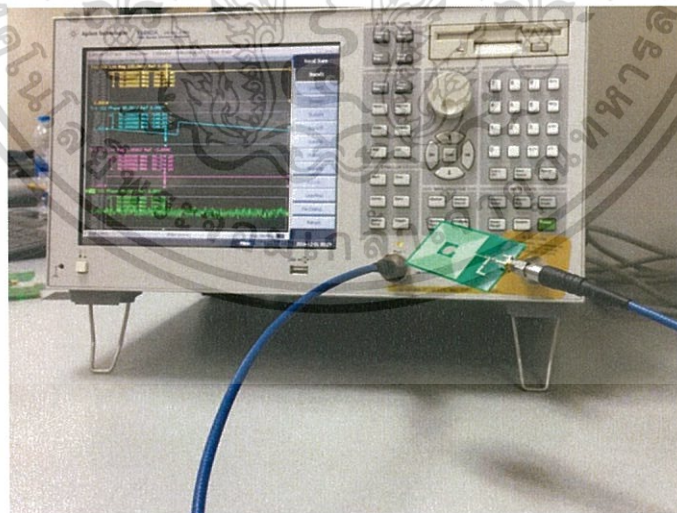
### 3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1.3.1 การวัดค่าสายอากาศ

ขั้นตอนนี้จะเป็นการวัดค่า  $s_{11}$  (อยู่ในรูป Magnitude กับ Phase) ของสายอากาศเปล่าที่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์ค, สายอากาศแบบมีแผ่นเฟอร์ไรต์และสายอากาศเปล่าที่ไม่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์คแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศในรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข) จะนำไปใช้ในรวมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแม่ทิงเน็ตเวิร์คในหัวข้อถัดไปเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัด โดยการวัดค่าในหัวข้อนี้จะเป็นการวัดแบบ 1 Port ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นการต่อวัดจริงโดยใช้ SMA connector เสียบเข้ากับสายอากาศและใช้สายโคแอกเซียลเชื่อมต่อเข้ากับ Network Analyzer และ 3.6 แสดง schematic ในการวัดซึ่งค่า  $s_{11}$  ที่วัดได้นั้นจะเป็นค่ารวมของ SMA connector , แม่ทิงเน็ตเวิร์ค และสายอากาศตามลำดับ



รูปที่ 3.6 สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง (ก) สายอากาศธรรมดาที่ไม่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์ค, (ข) สายอากาศแบบมีแผ่นเฟอร์ไรต์ที่ไม่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์ค, (ค) สายอากาศแยกธรรมดาที่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์ค, (ง) สายอากาศแบบมีแผ่นเฟอร์ไรต์ที่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์ค

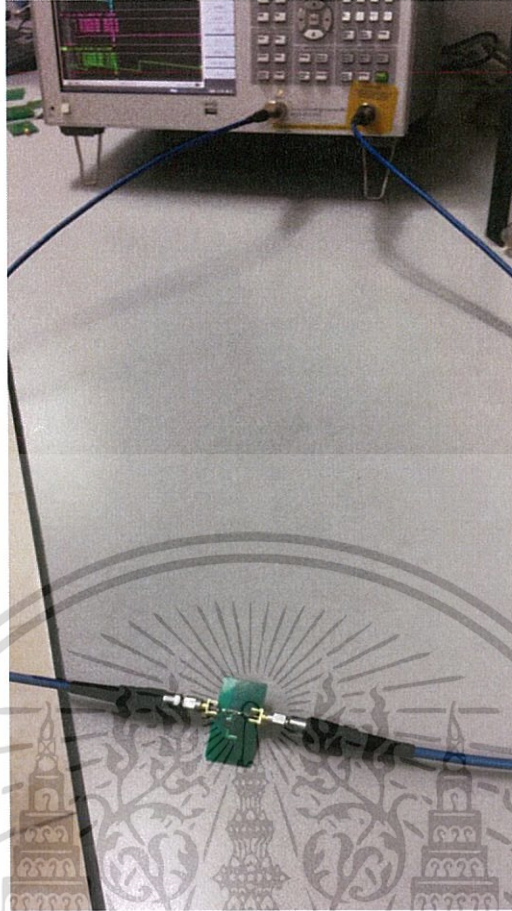


รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อสายอากาศที่มีแม่ทิงเน็ตเวิร์คกับ Network Analyzer

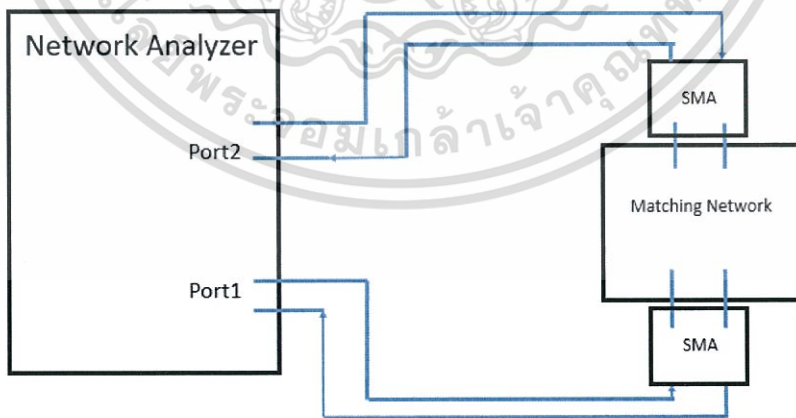
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







รูปที่ 3.9 การเชื่อมต่อแมทซิงเน็ตเวิร์คกับ Network Analyzer

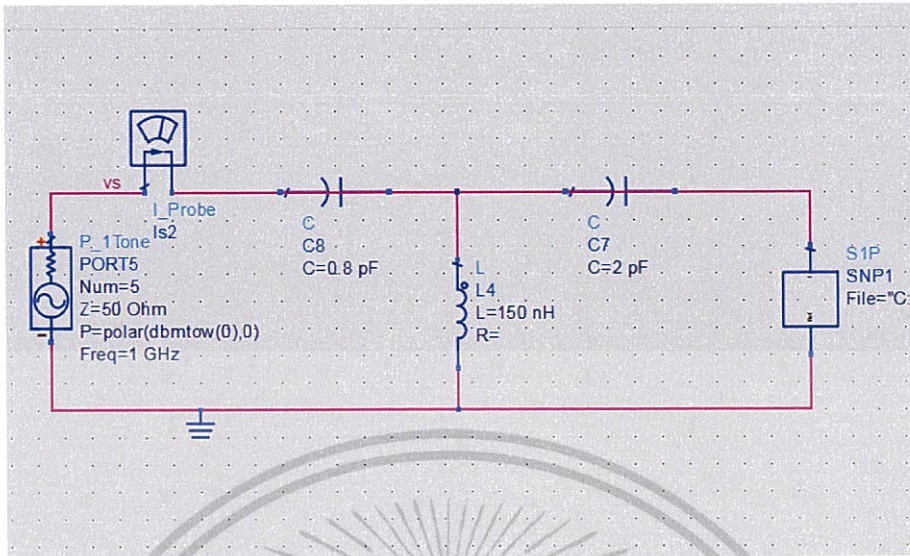


รูปที่ 3.10 Schematic ของการวัดค่าแมทซิงเน็ตเวิร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.1.3.3 การจำลองสายอากาศและแมทซิงเน็ตเวิร์ค



รูปที่ 3.11 Schematic จำลองวงจรสายอากาศรวมกับแมทซิงเน็ตเวิร์คโดยใช้โปรแกรม ADS

จากรูปที่ 3.11 เป็นการจำลองสายอากาศที่รวมกับแมทซิงเน็ตเวิร์คโดยส่วนประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำคือแมทซิงเน็ตเวิร์ค SP1 คือค่าพารามิเตอร์ที่ลบผลของ SMA ออกจากสายอากาศเปล่า ซึ่งจะนำค่า  $s$  พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดสายอากาศจริงโดยการพลอตกราฟ สามารถดูรายละเอียดการจำลองได้ที่ภาคผนวก ข

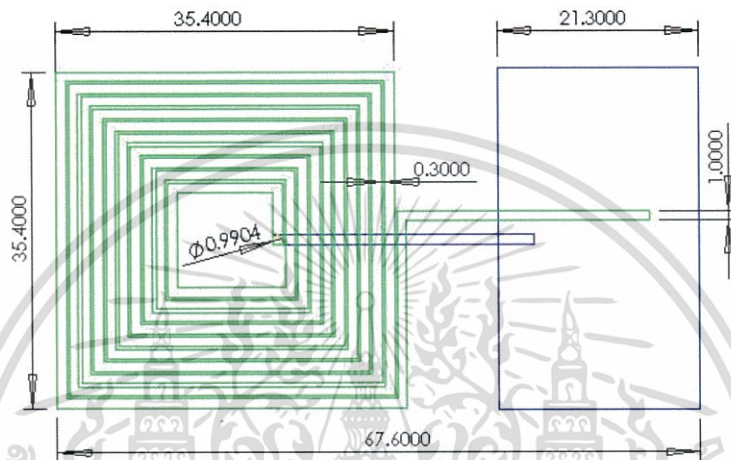
## 3.2 การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศ

เมื่อทำการทดสอบการแมทซิงสายอากาศธรรมดาและสายอากาศที่มีสารเฟอร์ไรต์เพื่อทดสอบว่าสายอากาศทั้งสองชนิดสามารถเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต้องการได้หรือไม่ในหัวข้อที่ 3.1 แล้ว ในหัวข้อนี้จะเป็นการพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศทั้งสองชนิดโดยจะทำการทดสอบและเปรียบเทียบผล ดังนี้

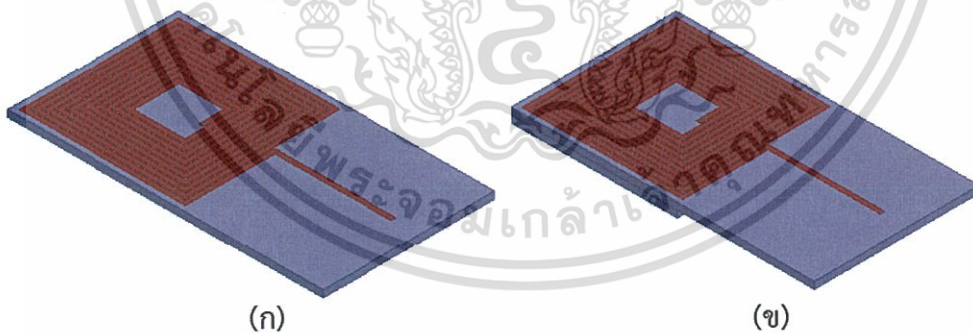
1. จำลองความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell
2. การส่งผ่านพลังงานระยะใกล้

### 3.2.1 การจำลองและเปรียบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็ก

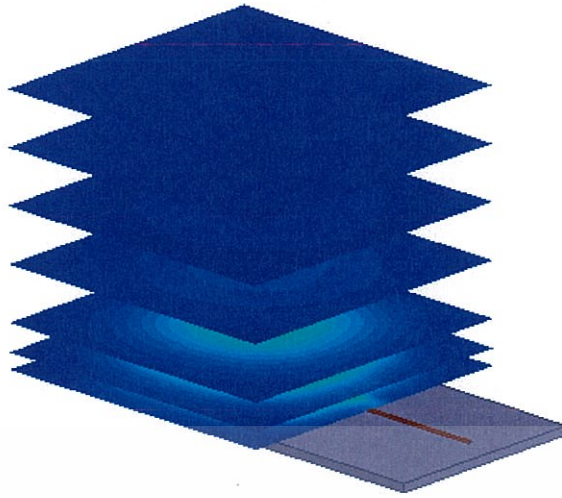
การจำลองความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศเป็นการวัดความสามารถในการปล่อยพลังงานในรูปแบบของสนามแม่เหล็กของสายอากาศทำได้โดยการใช้โปรแกรม ANSYS Maxwell โดยการจำลองจะวัดความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) ที่ตำแหน่งเหนือสายอากาศในแนวขนานเป็นระยะ 2, 5, 10, 20, 30, 40, และ 50 มิลลิเมตร โดยการจ่ายกระแส 1 A เข้าไปที่สายอากาศ มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 3.13 โมเดลสายอากาศที่ใช้ในการจำลอง (ก) สายอากาศแบบธรรมดา (ข) สายอากาศแบบมีแผ่นเฟอร์ไรต์

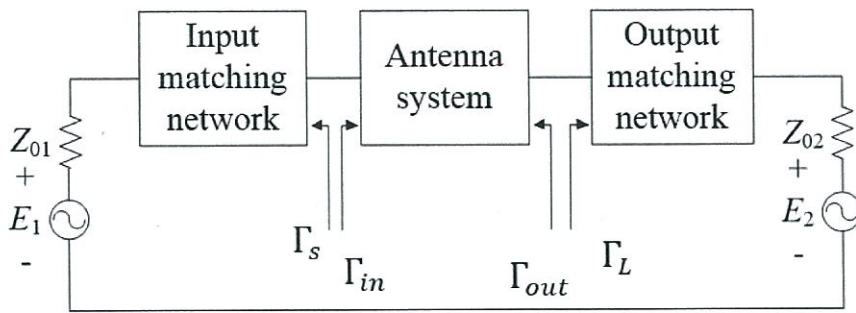


รูปที่ 3.14 แสดงระนาบในการวัดความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กของสายอากาศที่ระยะ 2, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร

เมื่อทำการจำลองความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กของสายอากาศธรรมดาและสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์เรียบร้อยแล้วจึงนำค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบ ซึ่งวิธีการทำการจำลองได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งการจำลองในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศทั้ง 2 ชนิด ในทางทฤษฎีเท่านั้น

### 3.2.2 การศึกษาการถ่านไอออนพลังงานในระยะใกล้

ในการเปรียบเทียบการส่งผ่านพลังงานระยะใกล้ของสายอากาศทั้งสองจะทำโดยการใช้สายอากาศแบบเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 จำนวน 2 ตัว โดยแรกจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวส่งส่วนอีกตัวทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวรับโดยกรณีสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์จะทำการใส่ที่สายอากาศตัวส่ง ในการวัดจะจ่ายพลังงานเข้าที่สายอากาศตัวส่งและใช้สายอากาศตัวรับวางไว้ที่ตำแหน่ง 2, 5, และ 10 มิลลิเมตรและเปรียบเทียบ Power gain ที่ได้สายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศแบบที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์ แบบใดได้ค่า gain ที่สูงกว่าแสดงว่าสายอากาศชนิดนั้นมีการส่งผ่านพลังงานได้ดีกว่าโดยจะเปรียบเทียบผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม ADS และจากการวัดจริงรูปที่ 3.15 แสดงระบบของสายอากาศแบบ 2 พอร์ตซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งวางในแนวขนานกัน โดยสายอากาศทั้งสองเชื่อมต่อกับอินพุตและเอาต์พุตแมทชิงเน็ตเวิร์ค



รูปที่ 3.15 ระบบสายอากาศแบบ 2 พอร์ต

ซึ่งในการออกแบบสายอากาศที่อยู่ในระบบ 2 พอร์ตนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการแมทชิงเนตเวิร์คดังกล่าวเพื่อให้คอนจูเกตของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของระบบสายอากาศที่มองจากพอร์ตที่ 1 ( $\Gamma_{in}^*$ ) เท่ากับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของอินพุตแมทชิงเนตเวิร์คที่มองย้อนกลับไปทางพอร์ตที่ 1 ( $\Gamma_s$ ) ซึ่งเป็นพอร์ตที่ส่งพลังงานคลื่น และให้คอนจูเกตของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของระบบสายอากาศที่มองจากพอร์ตที่ 2 ( $\Gamma_{out}^*$ ) เท่ากับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของเอาต์พุตแมทชิงเนตเวิร์คที่มองย้อนกลับไปทางพอร์ตที่ 2 ( $\Gamma_L$ )

$$\Gamma_s = \Gamma_{in}^* \quad (3.1)$$

$$\Gamma_L = \Gamma_{out}^* \quad (3.2)$$

ซึ่งการออกแบบแมทชิงเนตเวิร์ควิธีนี้เรียกว่าวิธี Conjugate Match [5] โดยจะนำค่า  $\Gamma_s$  และ  $\Gamma_L^*$  ไปออกแบบแมทชิงเนตเวิร์คโดยใช้ smith chart ที่ความถี่ 13.56 MHz โดยที่  $\Gamma_s$  และ  $\Gamma_L$  หาได้ดังนี้

$$\Gamma_s = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (3.3)$$

$$\Gamma_L = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$B_1 = 1 + |s_{11}|^2 - |s_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (3.5)$$

$$B_2 = 1 + |s_{22}|^2 - |s_{11}|^2 - |\Delta|^2 \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 = s_{11} - \Delta s_{22}^* \quad (3.7)$$

$$C_2 = s_{22} - \Delta s_{11}^* \quad (3.8)$$

$$\Delta = s_{11}s_{22} - s_{12}s_{21} \quad (3.9)$$

โดยที่  $s$  คือค่า  $s$  parameters ของระบบสายอากาศ

ซึ่งค่า Power gain ที่จะใช้เปรียบเทียบในบทนี้ประกอบไปด้วย Transducer power gain,  $G_T$  คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ส่งผ่านไปยังโหลดกับพลังงานของแหล่งจ่าย Operating power gain,  $G_p$  คืออัตราส่วนของพลังงานที่ส่งผ่านไปยังโหลดกับพลังงานที่เข้าสู่เน็ตเวิร์ค (ระบบสายอากาศ) [9] โดยมีสมการดังนี้

$$G_T = \frac{\text{power delivered to the load}}{\text{power available from the source}} = |s_{21}|^2 \quad (3.10)$$

$$G_p = \frac{\text{power delivered to the load}}{\text{power input to the network}} = \frac{1}{1-|s_{11}|^2} * G_T \quad (3.11)$$

เมื่อทราบถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณแล้ว ต่อไปจะเป็นขั้นตอนการทดลองโดยจะแบ่งออกเป็น การจำลองการส่งผ่านพลังงาน และการวัดค่าการส่งผ่านพลังงาน โดยอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองมีดังต่อไปนี้

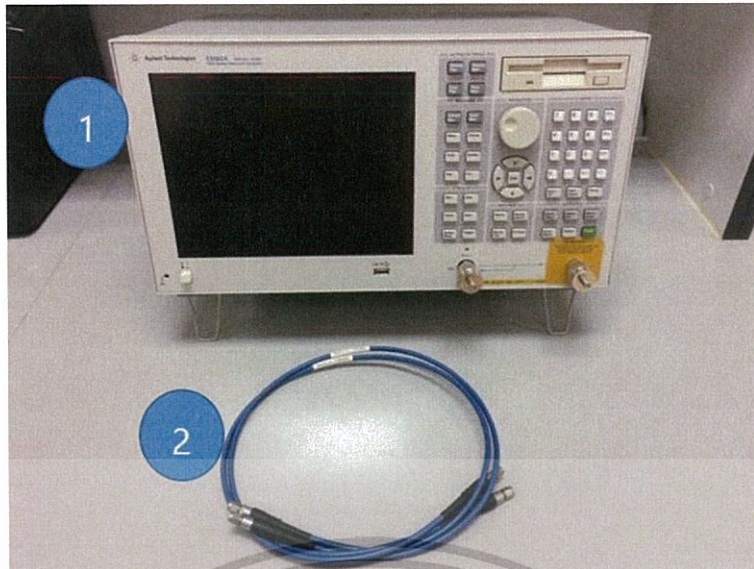
### 3.2.2.1 การจำลองการส่งผ่านพลังงานของสายอากาศด้วยโปรแกรม Advanced Design System

ในการจำลองนี้จะใช้ค่า  $s$  parameters ของระบบสายอากาศมาคำนวณหาแมทซิงเน็ตเวิร์ค จากนั้นจึงใช้โปรแกรม Advanced Design System ในการใส่วงจรแมทซิงเพื่อวัดค่า

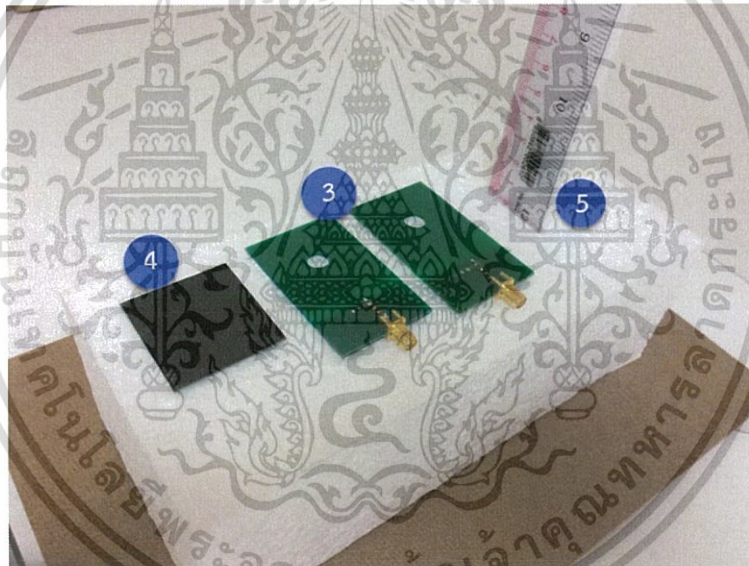
#### 3.2.2.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. E5062A ENA-L RF Network Analyzer
2. สายโคแอกเซียล
3. สายอากาศบนแผ่น PCB แบบธรรมดาที่มีแมทซิงเน็ตเวิร์ค 2 ตัว (ตัวรับและตัวส่ง)
4. แผ่นสติกเกอร์เฟอร์ไรต์ติดเข้ากับแผ่น PCB เปล่า ขนาด  $4 \times 3.8 \times 1.6$  มิลลิเมตร
5. แท่นวางพร้อมไม้บรรทัดวัดระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์การทดลอง



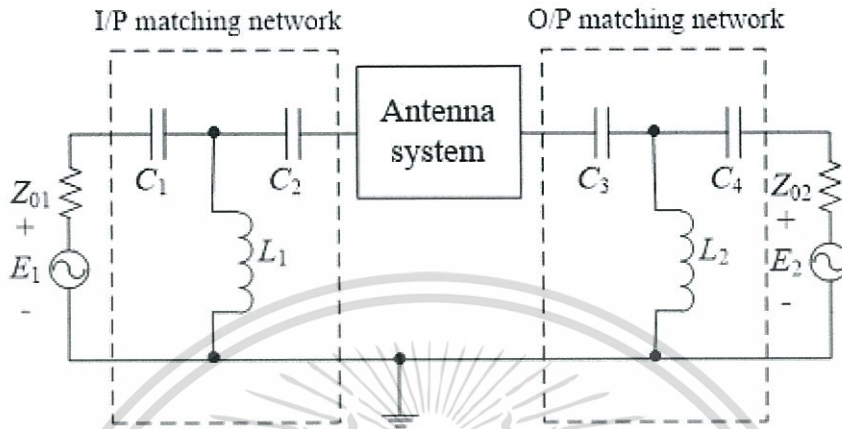
รูปที่ 3.17 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ)

#### 3.2.2.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวัดค่า s parameters ของระบบสายอากาศที่ความถี่ 13.56 MHz โดยนำสายอากาศตัวส่งแบบธรรมดาวางในแนวระนาบจากนั้นนำสายอากาศตัวรับวางคว่ำให้ห่างเป็นระยะ 2, 5, และ 10 มิลลิเมตร จากนั้นเปลี่ยนสายอากาศตัวส่งเป็นแบบที่ไม่แผ่นเฟอร์ไรต์แล้ววัดค่า s parameters อีกครั้งแล้วบันทึกค่า
2. ลบค่า s parameters ของหัวเชื่อมต่อ SMA ออกจากระบบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำค่า s parameters ที่ลบผลของหัวเชื่อมต่อ SMA ออกแล้วมาคำนวณหาค่า  $\Gamma_S$  และ  $\Gamma_L$  ตามสมการที่ (3.3) ถึง (3.9) เพื่อที่จะได้นำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาแมทชิงเน็ตเวิร์คแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แมทชิงเน็ตเวิร์คของระบบสายอากาศ

4. นำค่า  $\Gamma_S$  และ  $\Gamma_L$  มาทำการคอนจูเกตแล้วคำนวณหาแมทชิงเน็ตเวิร์คในรูปแบบเดียวกับแมทชิงเน็ตเวิร์คในหัวข้อ 3.1.2 โดยออกแบบได้ค่าดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แมทชิงเน็ตเวิร์คของระบบสายอากาศที่ระยะการวัดต่าง ๆ

Distance (mm)	Transmitting Antenna	C1 (pF)	L1 (nH)	C2 (pF)	C3 (pF)	L2 (nH)	C4 (pF)
2	Bare	220	1000	82	82	1000	220
	Ferrite	180	1500	2700	75	1000	330
5	Bare	160	2200	160	160	2200	160
	Ferrite	120	1000	47	56	820	220
10	Bare	330	2200	56	56	2200	330
	Ferrite	160	2200	75	47	1000	390

5. ใช้โปรแกรม Advanced Design System ในการจำลองการส่งผ่านพลังงาน โดยจะใช้ค่า s parameter ที่ได้จากการวัดสายอากาศบันทึกลงในไฟล์สกุล .s2p เมื่อเปิดด้วย Notepad จะมีเนื้อหาภายในไฟล์เป็นดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

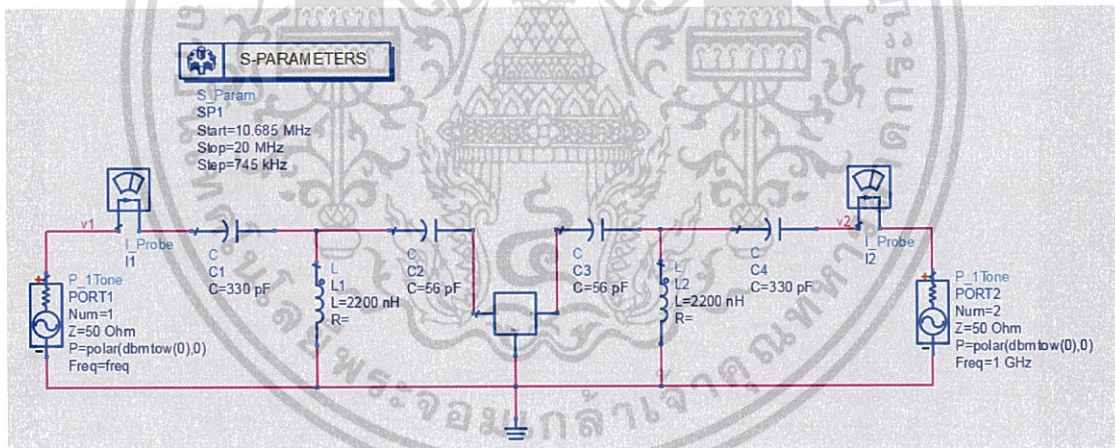
Bare_Antenna_system02mm - Notepad
File Edit Format View Help
! Measurement 23 June 2017
! sma connector measurement
# Hz S ma R 50
! 2 Port Network
! freq magS11 angS11 magS21 angS21 magS12 angS12 magS22 angS22
!
13665000 0.883622349 35.92406998 0.417010493 127.1371291 0.417010493 127.1371291 0.883622349 35.92406998

```

รูปที่ 3.19 เนื้อหาภายในไฟล์ .s2p

จากรูปเป็นตัวอย่างค่า s parameters ของระบบสายอากาศแบบธรรมดาโดยวัดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร โดยจะต้องใส่ค่า s parameters ในบรรทัดที่ 8 โดยเรียงลำดับการใส่ค่าตามบรรทัดที่ 5

6. ทำการต่อวงจรในโปรแกรม Advanced Design System ดังรูปที่ 3.20 และทำการจำลองเพื่อหาค่า s parameters



รูปที่ 3.20 วงจรในการจำลองสายอากาศ

7. และนำค่า s parameters ที่ได้จากการจำลองมาคำนวณหาค่า Power gain ตามสมการที่ 3.10 และ 3.11

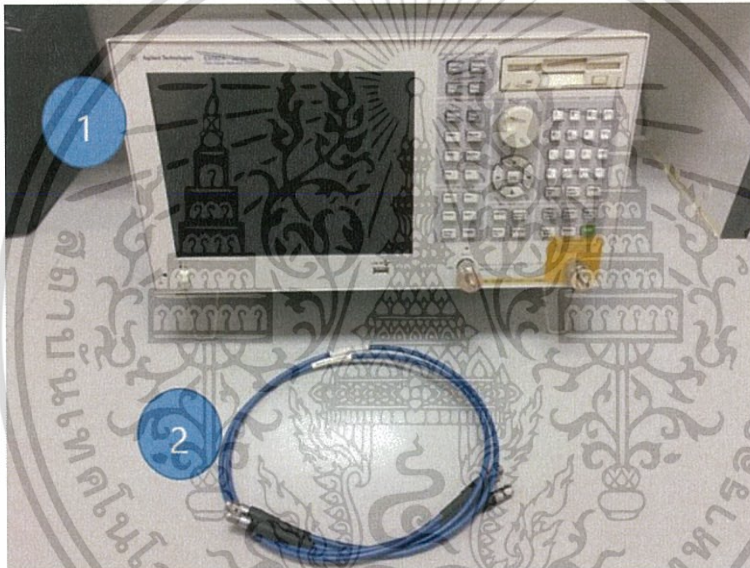
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.2 การวัดค่าการส่งผ่านพลังงานของสายอากาศ

เมื่อทำการจำลองการส่งผ่านพลังงานของสายอากาศในหัวข้อ 3.2.2.1 ที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้ จะเป็นการวัดการส่งผ่านพลังงานของสายอากาศเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบโดยมีอุปกรณ์และขั้นตอน ดังต่อไปนี้

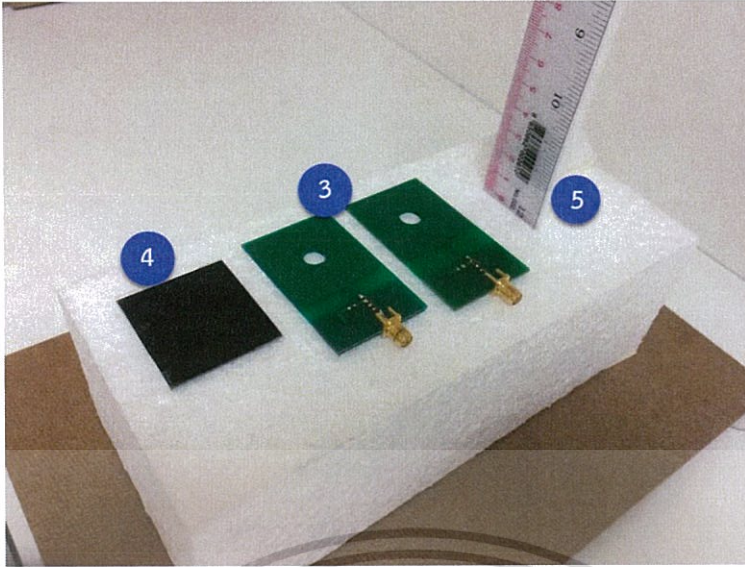
#### 3.2.2.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. E5062A ENA-L RF Network Analyzer
2. สายโคแอกเซียล
3. สายอากาศบนแผ่นแบบธรรมดาที่มีแมทชิ่งเน็ตเวิร์ค 2 ตัว (ตัวรับและตัวส่ง)
4. แผ่นสติกเกอร์เฟอร์ไรต์ติดเข้ากับแผ่น PCB เปล่า ขนาด 4 x 3.8 x 1.6 มิลลิเมตร
5. ไม้บรรทัดวัดระยะ



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์การทดลอง

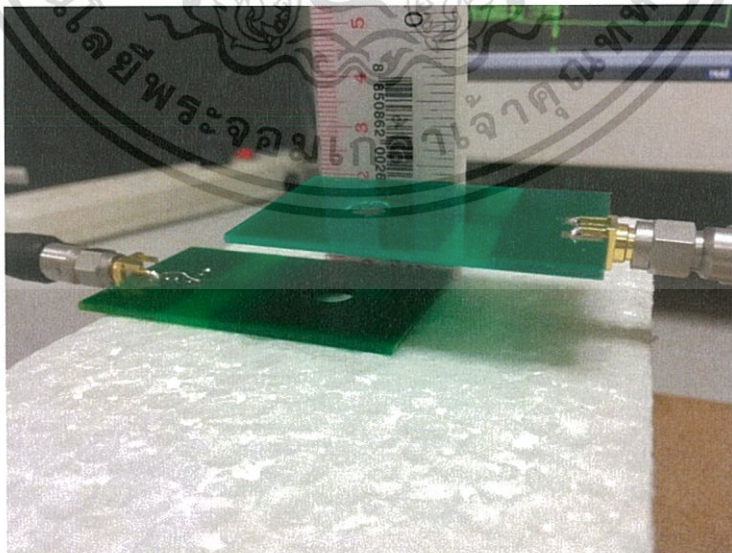
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ)

#### 3.2.2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งมาทำการบัดกรีเมทซิงเนตเวิร์คตามระยะที่จะทำการวัดตามตารางที่ 3.5
2. ทำการวัดค่า s parameters ที่ความถี่ 13.56 MHz ที่ระยะต่าง ๆ โดยนำสายอากาศตัวส่งต่อเข้ากับพอร์ต 1 และนำสายอากาศตัวรับต่อเข้ากับพอร์ต 2 ของเครื่อง Network Analyzer ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การวัดค่า s parameters ของระบบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

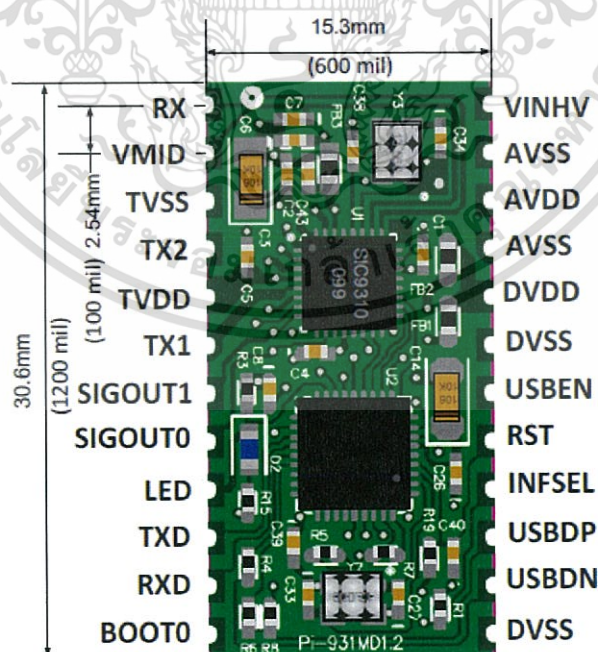
3. นำค่า s parameters ของระบบสายอากาศที่ 13.56 MHz มาทำการลบค่า s parameters ของหัวเชื่อมต่อ SMA แบบ 2 พอร์ต
4. ทำการคำนวณหาค่า Power gain ตามสมการที่ 3.10 และ 3.11
5. นำค่า Gain ที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงมาทำการเปรียบเทียบกัน

### 3.3 การออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาการออกแบบสายอากาศที่สามารถใช้กับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz โดยจะทำการนำสายอากาศที่ออกแบบไว้มาทำการศึกษาวิธีการที่จะทำให้สามารถใช้สายอากาศดังกล่าวกับเครื่องอ่าน RFID ได้ และทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการอ่านระหว่างสายอากาศแบบธรรมดาและแบบมีแผ่นเฟอร์ไรต์รวมทั้งเปรียบเทียบระยะเวลาการอ่านเมื่อเครื่องอ่าน RFID อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ โดยใช้ Module สำหรับอ่าน RFID คือ 13.56 MHz Multi-Standard RFID Reader Module ของ Silicon Craft รุ่น Pi-931MD

#### 13.56 MHz Multi-Standard RFID Reader Module Pi-931MD

Pi-931 เป็น Module ขนาดเล็กสำหรับอ่าน RFID ของบริษัท Silicon Craft ภายในมี IC หลักคือ SIC9310 ซึ่งเป็น IC ประสิทธิภาพสูงที่ใช้สำหรับอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz แบบไม่มีการสัมผัสระหว่างตัว Tag กับเครื่องอ่าน โดยมีส่วนประกอบและคำอธิบายขา Pin ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.24 และ ตารางที่ 3.6 และ Block diagram คร่าว ๆ ดังรูปที่ 3.25



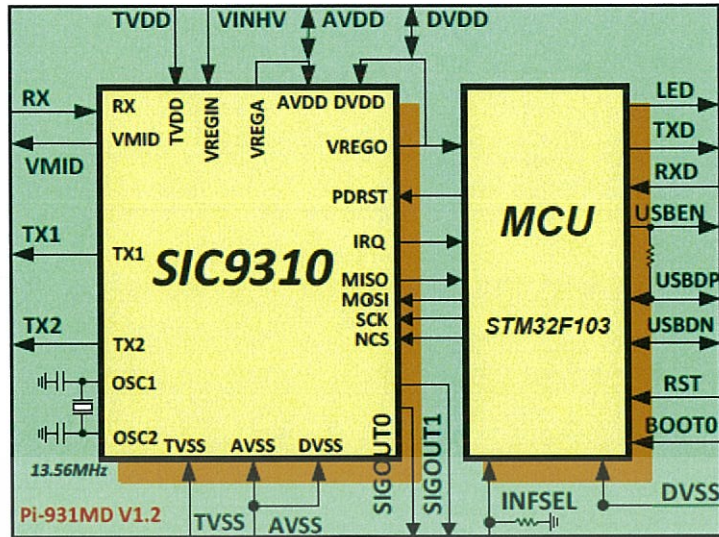
รูปที่ 3.24 ส่วนประกอบและขาเชื่อมต่อของ Module Pi-931MD [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 อธิบายการทำงานของขา Pin ต่าง ๆ ของ Module Pi-931MD

PIN	SYMBOL	TYPE	Related SUPPLY	Description
1	RX	IN	AVDD, AVSS	Receiver Input
2	VMID	OUT	AVDD, AVSS	Mid Rail Reference Voltage
3	TVSS	Power	TVDD, TVSS	Transmitter Ground
4	TX2	OUT	TVDD, TVSS	Transmitter Output 2
5	TVDD	Power	TVDD, TVSS	Transmitter VDD
6	TX1	OUT	TVDD, TVSS	Transmitter Output 1
7	SIGOUT1	OUT	DVDD, DVSS	Test signal SIGOUT1 from SIC9310
8	SIGOUT0	OUT	DVDD, DVSS	Test signal SIGOUT0 from SIC9310
9	LED	OUT	DVDD, DVSS	LED Output
10	UTXD	OUT	DVDD, DVSS	UART TX
11	URXD	IN	DVDD, DVSS	UART RX
12	BOOT0	IN	DVDD, DVSS	Firmware Programming Enable
13	DVSS	Power	DVDD, DVSS	Digital Ground
14	USBDN	IN/OUT	DVDD, DVSS	USB DN
15	USBDP	IN/OUT	DVDD, DVSS	USB DP
16	INFSEL	IN	DVDD, DVSS	Interface select (0 = USB, 1 = RS232)
17	RST	IN	DVDD, DVSS	Reset
18	USBEN	Power	DVDD, DVSS	USB Enable (Left Float)
19	DVSS	Power	DVDD, DVSS	Digital Ground
20	DVDD	Power	DVDD, DVSS	Digital Positive Power Supply
21	AVSS	Power	AVDD, AVSS	Analog Ground
22	AVDD	Power	AVDD, AVSS	Analog Positive Power Supply
23	AVSS	Power	AVDD, AVSS	Analog Ground
24	VREGIN	Power	AVSS	Regulator Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 Block diagram อย่างง่ายของ Module Pi-931MD [9]

- คุณสมบัติต่าง ๆ ของ Pi-931MD

#### RFID Front-End Chip

- SIC9310

#### Supported Protocols

- ISO14443A/B, all bit rates: 106, 212, 424 and 848 kbps
- ISO15693, all modes
  - Downlink 1 of 4 and 1 of 256
  - Uplink 6.6/13/26/53 kbps with 1 & 2 sub-carrier
- MIFARE Classic

#### Card Compatibilities

- ISO14443A
  - MIFARE 1k, 4k, Mini, Ultralight
  - Smartcard ISO14443A
- ISO14443B
  - Smartcard ISO14443B, SRI4K, SRI512
- ISO15693
  - SIC5600,
  - ICODE-SLI, ICODE-SLI-L, ICODE-SLI-S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Hardware Features

- Support various RF topologies
  - Closed coupling antenna
  - Class E driver
- Read Range of the reference design (ISO15693)
  - 3.5 cm x 5 cm close coupling antenna: 10 cm
  - 14 cm x 14 cm close coupling antenna: 30 cm
- Host interface
  - 3.3V RS232 (UART): 115,200 kbps
  - USB 2.0 Full speed
- Heat dissipation pad
- High power transmitter
  - 200 mA @ 5V TVDD
  - 300 mA @ 7V TVDD
- Rx sensitivity down to 1 mVpkpk
- On-board 3.3V regulator
- LED Status
- Dimension: 17.8 mm x 30.8 mm
- DIP 24-pin compatible (100-mil spacing)

## Operating Conditions

- Storage temperature from -40 to 85oC
- Operating temperature from -40 to 85oC
- Core operating voltage from 2.7 to 3.3 V
- Transmitter operating voltage from 2.7 to 7 V
- Power consumption 60 mA in active mode (excluding Ant)

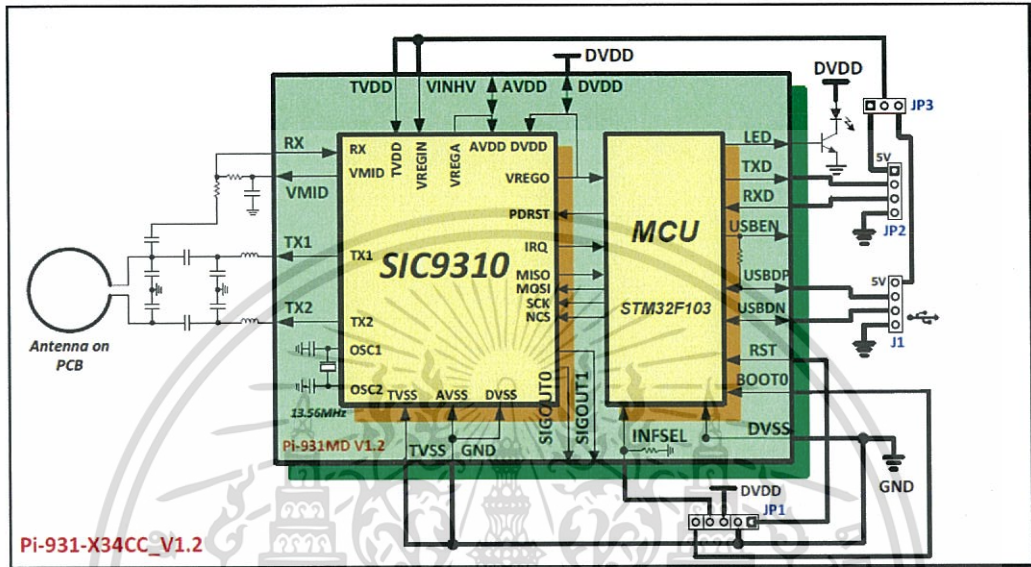
## Information Support

- Visual C# demonstration software
- Protocol Information

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

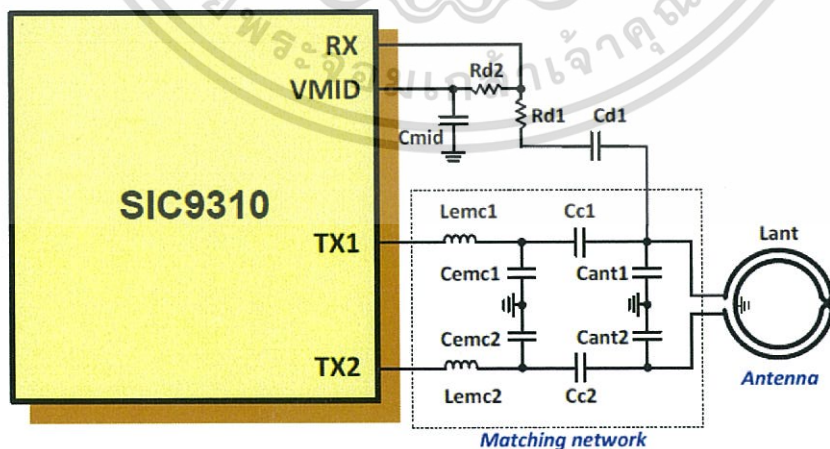
## - เครื่องอ่าน RFID

เครื่องอ่าน RFID ที่ใช้ในหัวข้อนี้จะใช้ Module Pi-931MD มาต่อตาม Block Diagram Pi931-X34CC\_V1.2 RFID Reader[Ref] ที่แสดงใน Data Sheet ของ Module Pi-931MD ดังรูปที่ 3.26 ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับ Computer ผ่าน USB Port



รูปที่ 3.26 แสดง Block diagram ของเครื่องอ่าน RFID Pi-931-X34CC [9]

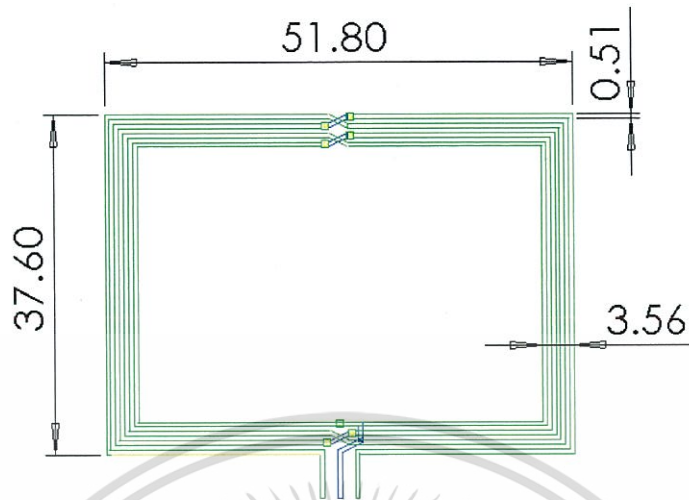
โดยส่วนของแมทซิงเน็ตเวิร์คแสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แสดงแมทซิงเน็ตเวิร์คของเครื่องอ่าน RFID [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศที่ใช้กับเครื่องอ่าน RFID จะเป็นสายอากาศชนิด Differential มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.28 (มีลักษณะใกล้เคียงกับ Pi931-X34CC\_V1.2 RFID Reader เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ)

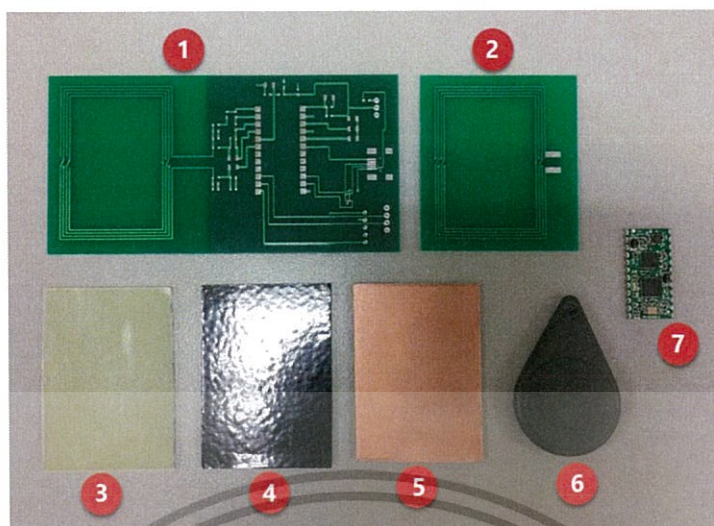


รูปที่ 3.28 แสดงโครงสร้างของสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร

### 3.3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. แผ่น PCB ลายวงจรของเครื่องอ่าน RFID Pi-931-X34CC\_V1.2
2. แผ่น PCB สายอากาศ
3. แผ่น PCB เปล่าขนาด  $4.2 \times 6 \times 1.6$  มิลลิเมตร
4. แผ่นเฟอร์ไรต์ ขนาด  $4.2 \times 6$  มิลลิเมตร
5. แผ่นทองแดงหนา 0.035 มิลลิเมตร บน PCB ขนาด  $4.2 \times 6 \times 1.6$  มิลลิเมตร
6. Tag ชนิด Passive มาตรฐาน ISO 14443A
7. Module Pi-9310MD
8. ฐานรองวัดพร้อมไม้บรรทัดวัดระยะ
9. เสาดั่งพร้อมไม้หนีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 อุปกรณ์การทดลอง

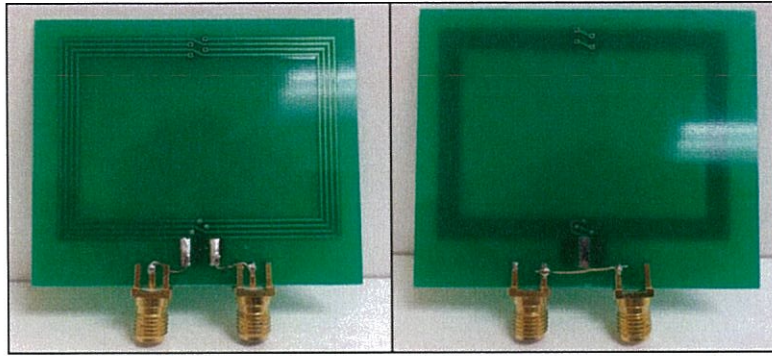


รูปที่ 3.30 อุปกรณ์การทดลอง (ต่อ)

### 3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวัดค่า  $s$  parameter ของสายอากาศธรรมดาแบบ 2 พอร์ตที่ความถี่ 13.56 MHz โดยการใส่หัวเชื่อมต่อ SMA เข้ากับสายอากาศดังรูปที่ 3.31 และเชื่อมต่อขาราวด์ของหัวเชื่อมต่อ SMA เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 การต่อสายอากาศสำหรับการวัดค่า s parameters แบบ 2 พอร์ต

2. จากนั้นนำแผ่นเฟอร์ไรต์ติดเข้ากับแผ่น PCB เปล่าขนาด 4.2 x 6 x 1.6 มิลลิเมตร แล้ววัดค่า s parameters ของสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์
3. นำค่า s parameters ของสายอากาศแบบธรรมดาและแบบที่มีเฟอร์ไรต์มาลบผลของหัวเชื่อมต่อ SMA แบบ 2 พอร์ตและคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ( $Z_a$ ) จากสมการ

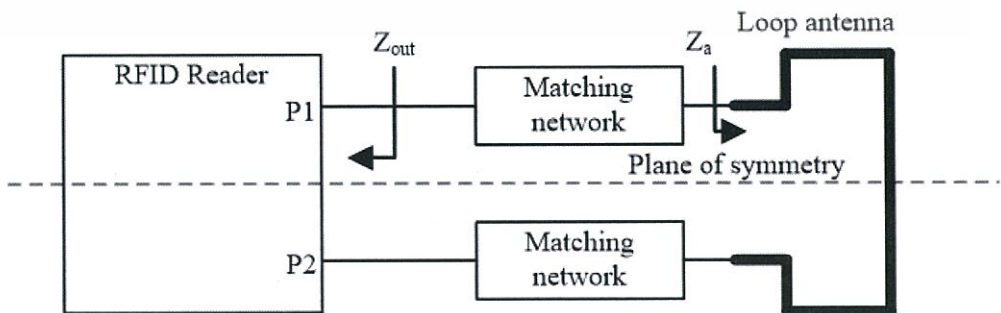
$$Z_a = Z_0 \frac{(1 + S_{11a})(1 + S_{22a}) - S_{12a}S_{21a}}{2S_{21a}} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของ Network Analyzer (50  $\Omega$ )

$Z_a$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

$S_a$  คือ ค่า s parameters ของสายอากาศ

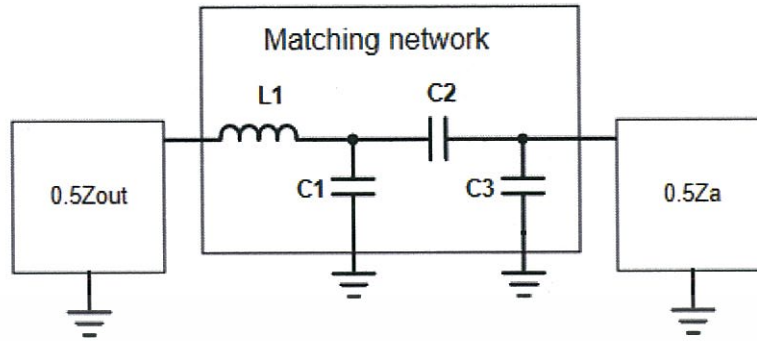
4. ต่อไปเป็นขั้นตอนการทำแมทซิงเน็ตเวิร์คโดยอ้างอิงจาก Data sheet HF RFID Antenna matching design ของบริษัท Silicon Craft ซึ่งเป็นการออกแบบแมทซิงเน็ตเวิร์คสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่มีสายอากาศแบบ Differential โดยขั้นตอนการทำจะเรียงต่อไปข้อที่ 5
5. ในการทำแมทซิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะทำการแบ่งครึ่งระบบดังรูปที่ 3.32 แล้วค่อยทำการออกแบบแมทซิงเน็ตเวิร์ค



รูปที่ 3.32 แสดงการแบ่งครึ่งระบบเครื่องอ่าน RFID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การทำแมทเช็ตเวิร์คจะนำครึ่งหนึ่งของค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศมาแมทไปที่ครึ่งหนึ่งของอิมพีแดนซ์เครื่องอ่าน RFID และออกแบบแมทชิงเน็ตเวิร์คดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องอ่าน RFID และแมทชิงเน็ตเวิร์ค

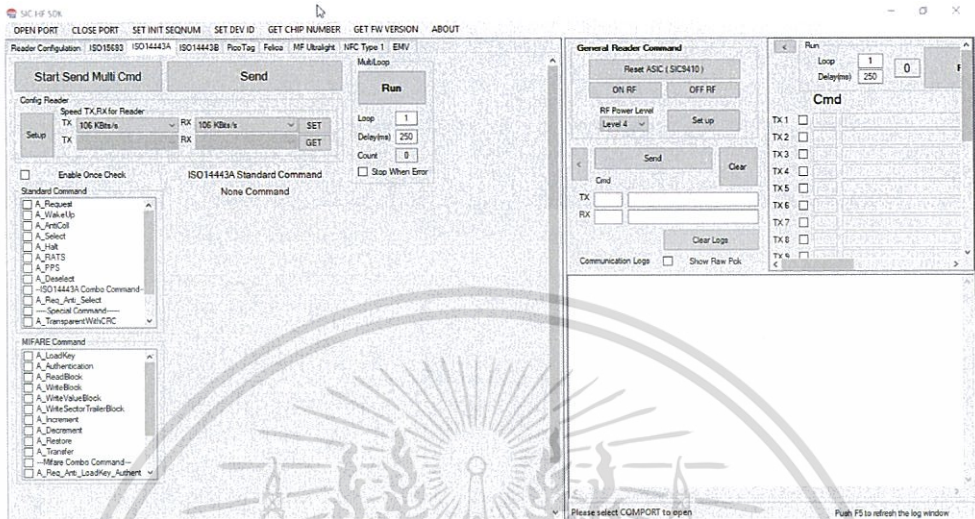
จะได้ค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแมทชิงเน็ตเวิร์คของสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศแบบมีเฟอร์ไรต์แสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรแมทชิง

ชนิดของสายอากาศ	ส่วนประกอบของแมทชิงเน็ตเวิร์ค			
	L <sub>1</sub> (nH)	C <sub>1</sub> (pF)	C <sub>2</sub> (pF)	C <sub>3</sub> (pF)
สายอากาศแบบธรรมดา	270	430	68	68
สายอากาศแบบมีเฟอร์ไรต์	470	430	160	68

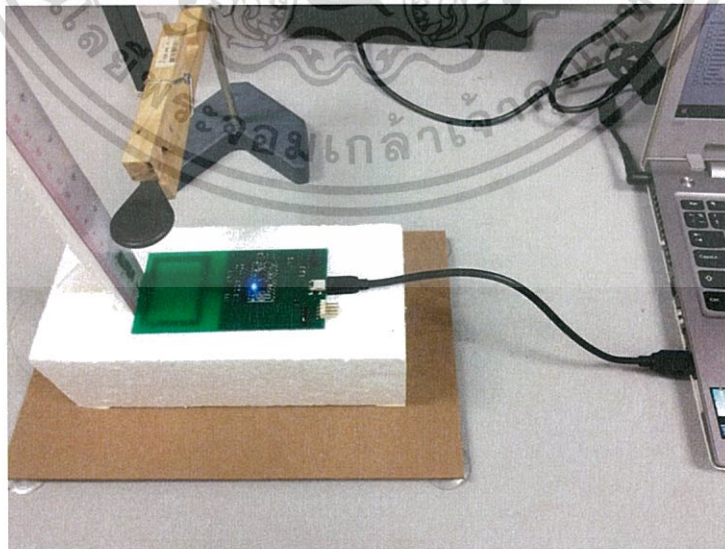
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการใส่วงจรแม่ทิงเข้ากับเครื่องอ่าน RFID แล้วเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB จากนั้นทำการเปิดโปรแกรม SIC HF SDK\_V1 ซึ่งเป็นโปรแกรมอ่าน RFID ที่ทางบริษัท Silicon Craft ให้มา มีหน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับอ่าน RFID SIC HF SDK\_V1

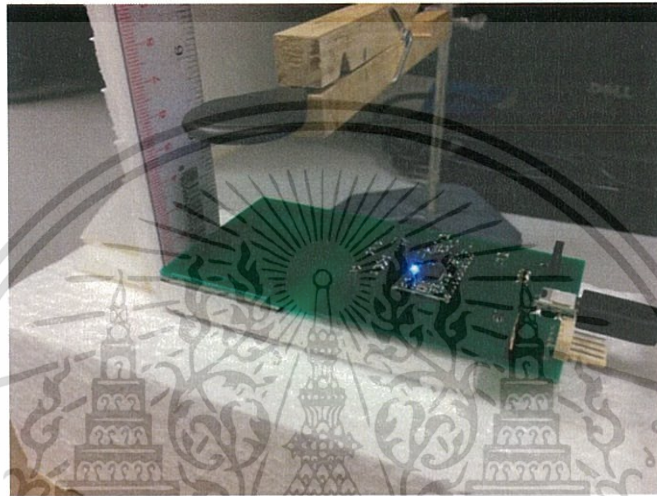
8. ทำการวัดระยะการอ่านสูงสุดโดยใช้ Tag มาตรฐาน ISO 14443A หนึ่งกับไม้หนีบเริ่มจากการเลื่อน Tag จากจุดที่เกินระยะการอ่านของเครื่องอ่าน RFID ลงมาจนกว่าจะเกิดการอ่าน Tag ได้ แสดงดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 แสดงการวัดระยะการอ่านสูงสุดของเครื่องอ่าน RFID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. จากนั้นทำการวัดระยะการอ่านสูงสุดเมื่อทำการเอียง Tag เป็นมุม 30, 45, 60 องศา แล้วบันทึกผลการวัด
10. ทำการวัดสายอากาศแบบมีเฟอร์ไรต์แบบเดียวกับที่ทำในสายอากาศแบบธรรมดา แล้วทำการบันทึกผล
11. จากนั้นจะทำการดูระยะในการอ่านเมื่อเครื่องอ่าน RFID อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ โดยการใช้แผ่นทองแดงหนา 0.035 มิลลิเมตร ที่ติดกับแผ่น PCB มาวางใต้เครื่องอ่านโดยชั้นด้วยแผ่นโฟมหนา 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.36 และทำการวัดระยะการอ่านสูงสุดทั้งสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศแบบมีเฟอร์ไรต์



รูปที่ 3.36 การวัดระยะการอ่านของเครื่องอ่าน RFID ในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ

12. บันทึกผลการทดลองลงตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศจากการทำอิมพีแดนซ์แมทซิงโดยการวัดด้วยวิธีต่าง ๆ

จากการทดลองในบทที่ 3.1 ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อทดสอบสายอากาศและทฤษฎีทางไมโครเวฟในการลดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ไม่ต้องการออกจากส่วนที่สนใจ เช่น การลดค่า s11 ของ SMA connector ออกจากสายอากาศแบบธรรมดา และลดค่า s11 ของ SMA connector ทั้งสองด้านออกจากแมทซิงเน็ตเวิร์คแล้ว ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จาก 3 วิธีคือ

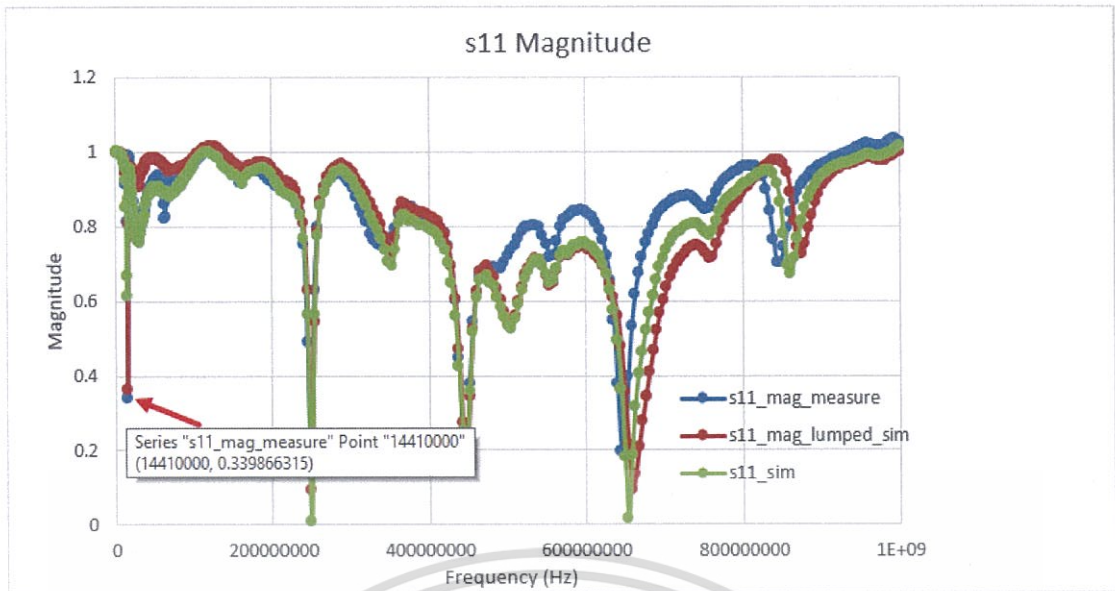
1. จากการวัดสายอากาศที่มีแมทซิงเน็ตเวิร์คโดยตรง
2. จากการวัดสายอากาศแยกกับแมทซิงเน็ตเวิร์คแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ทั้งสองมารวมกันตามทฤษฎีไมโครเวฟ
3. สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Advanced Design System

โดยผลการวัดที่ความถี่ต่าง ๆ โดยใช้ค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุของวงจรแมทซิงดังแสดงในตารางที่ 3.1 ได้ถูกพล็อตเปรียบเทียบกันดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศธรรมดา

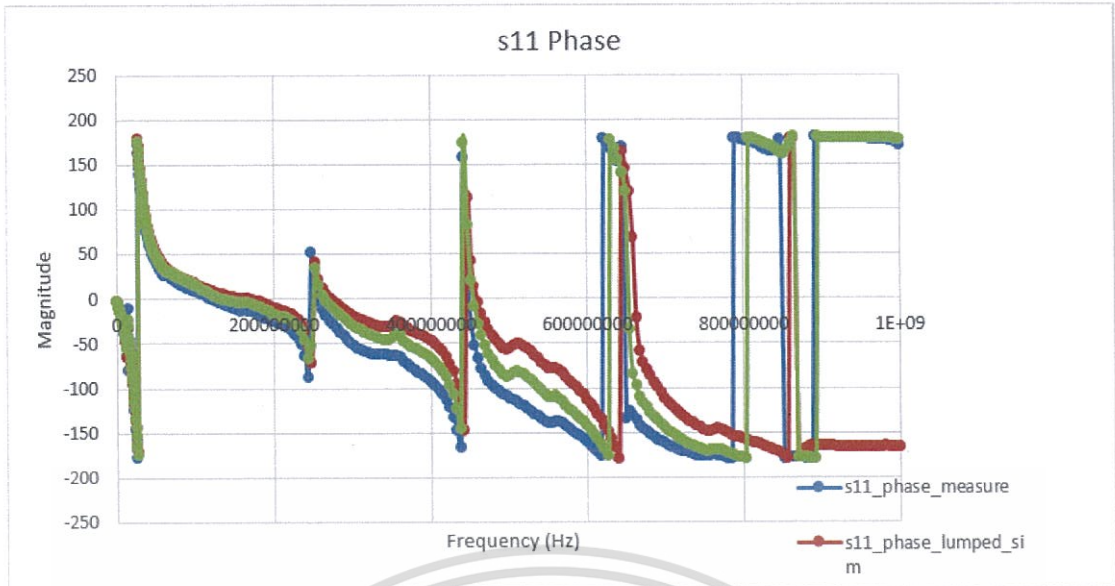
##### 4.1.1.1 แมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (s11) เทียบกับความถี่ตามลำดับ



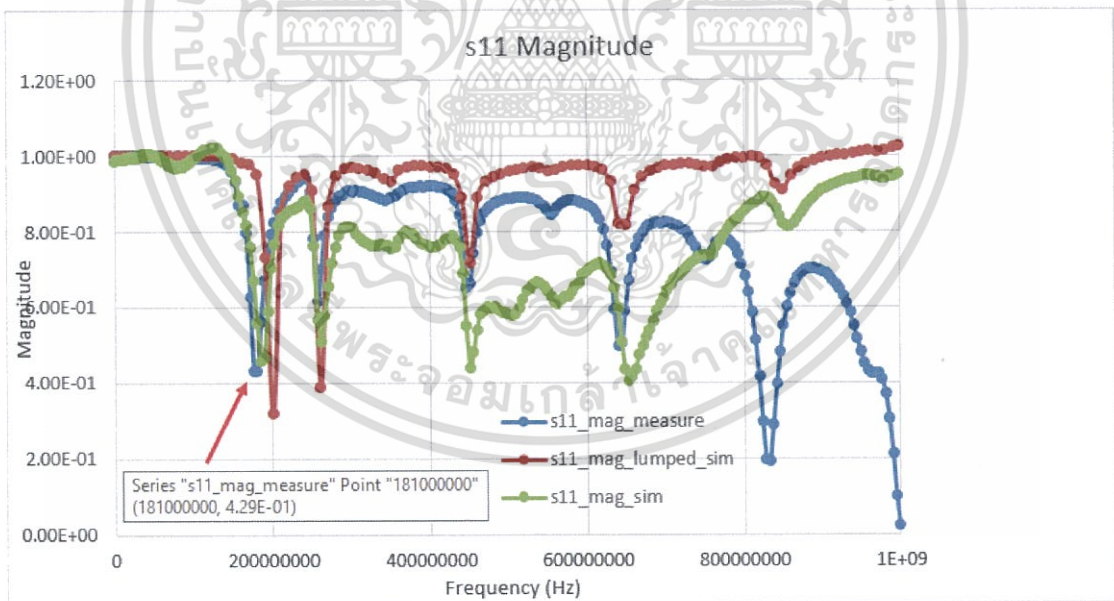
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของ  $s_{11}$  กับความถี่โดยเส้นสีฟ้าคือค่าที่ได้จากการวัด เส้นสีแดงคือค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Advanced Design System และเส้นสีเขียวคือค่าที่ได้จากการวัดสายอากาศและแมทซิงเน็ตเวิร์คแยกกันจากนั้นนำค่าที่วัดได้มารวมเข้าด้วยกันด้วยโปรแกรม Advanced Design System จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 14.4 MHz จะเกิด Peak แรกที่ค่าขนาดของ  $s_{11}$  ลดลงอย่างฉับพลันทำให้สายอากาศที่มีแมทซิงเน็ตเวิร์คสามารถส่งผ่านพลังงานได้ดีกว่าสายอากาศที่ไม่มีการทำอิมพีแดนซ์แมทซิงที่ความถี่นั้น ๆ ซึ่งการเกิด Peak ดังกล่าวจะเรียกว่าการเกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ดังกล่าวจะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Network Analyzer)  $\approx 50 \Omega$  และมีคาร์แอกแตนซ์  $\approx 0 \Omega$  โดยรวมแล้วค่าขนาด  $s_{11}$  ของทั้ง 3 วิธีมีความใกล้เคียงและเป็นไปในทางเดียวกันเช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงการพความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและความถี่ซึ่งกราฟที่ได้จากทั้ง 3 วิธีก็มีความใกล้เคียงกัน



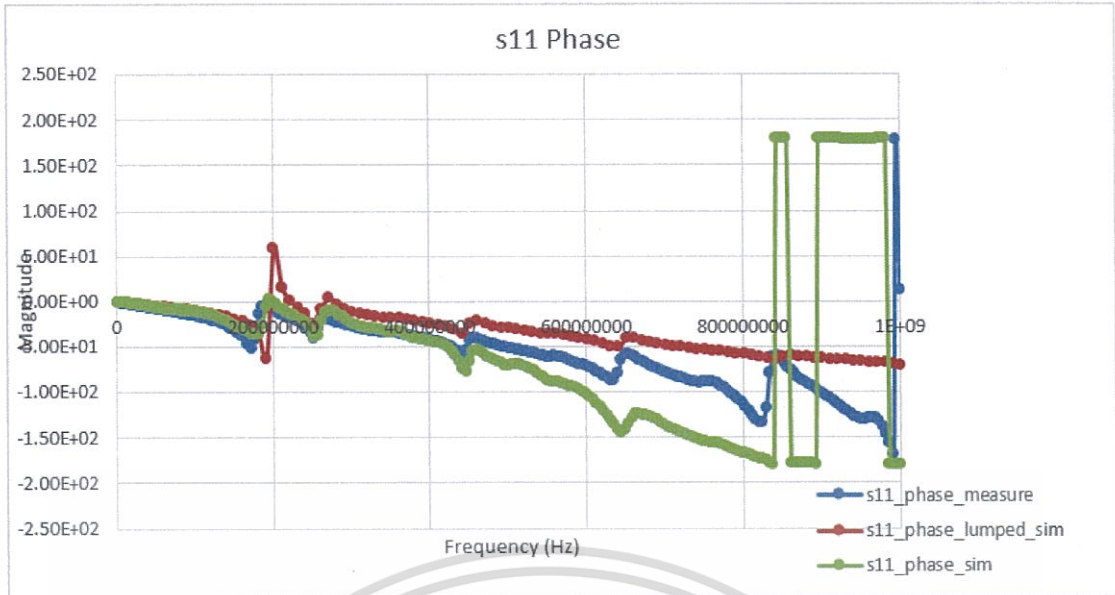
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz

#### 4.1.1.2 แมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz



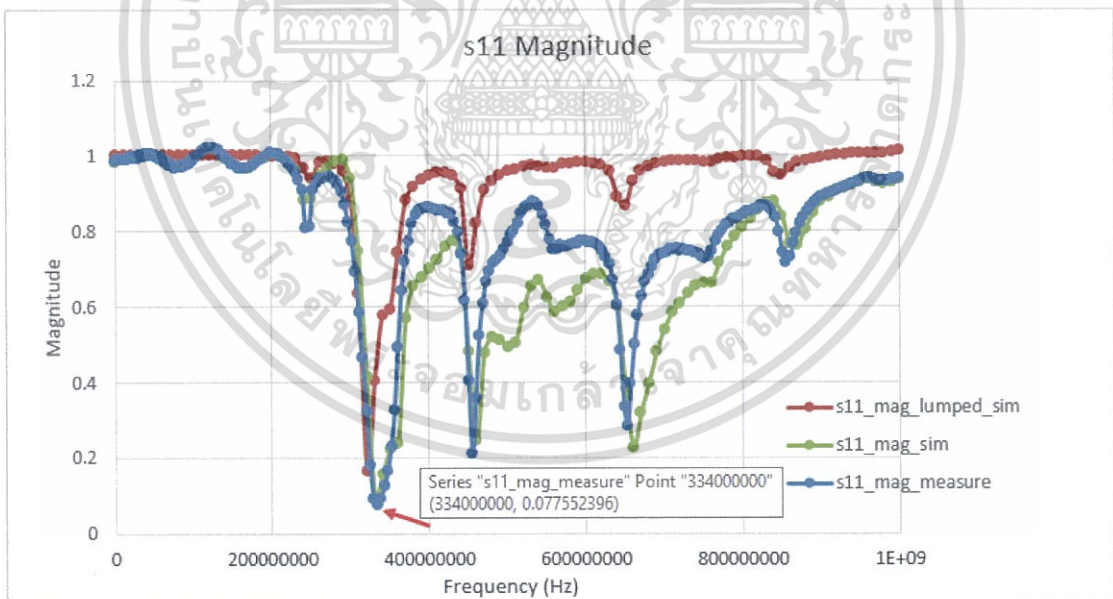
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



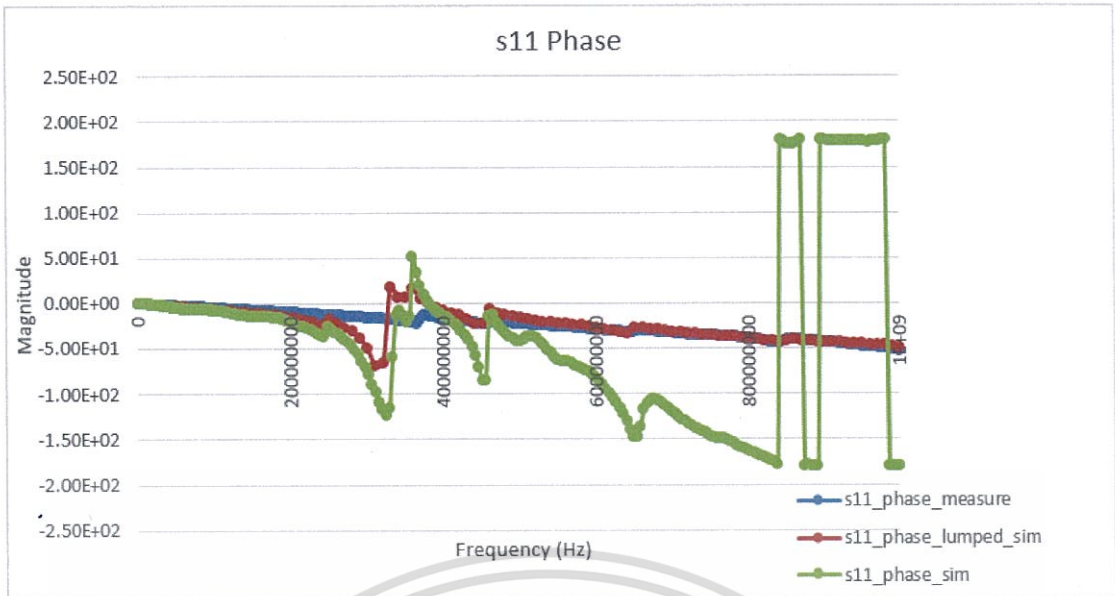
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz

#### 4.1.1.3 แมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz

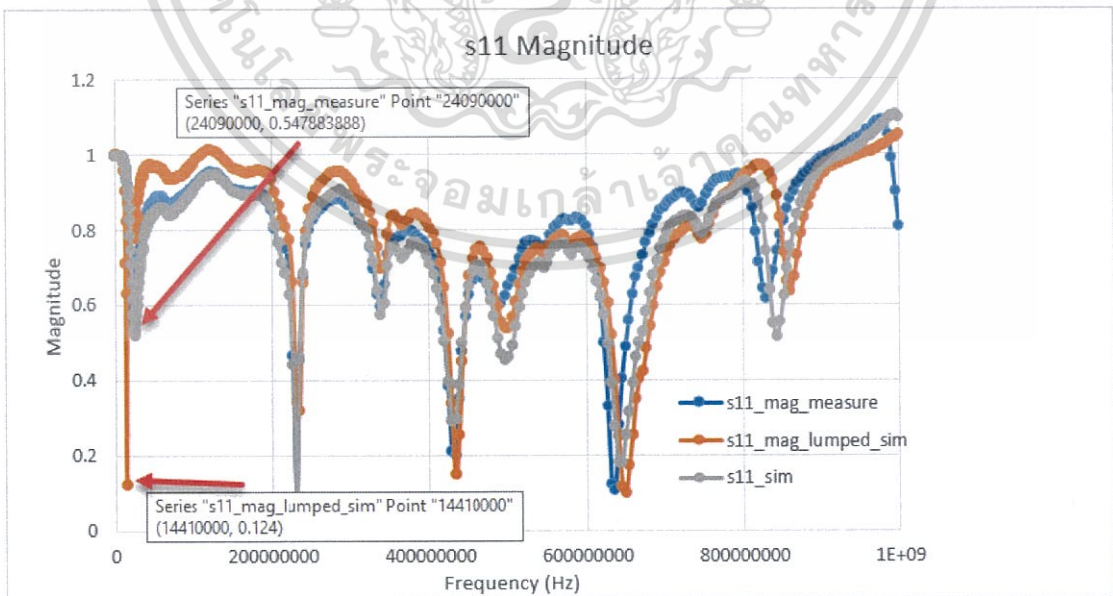
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz

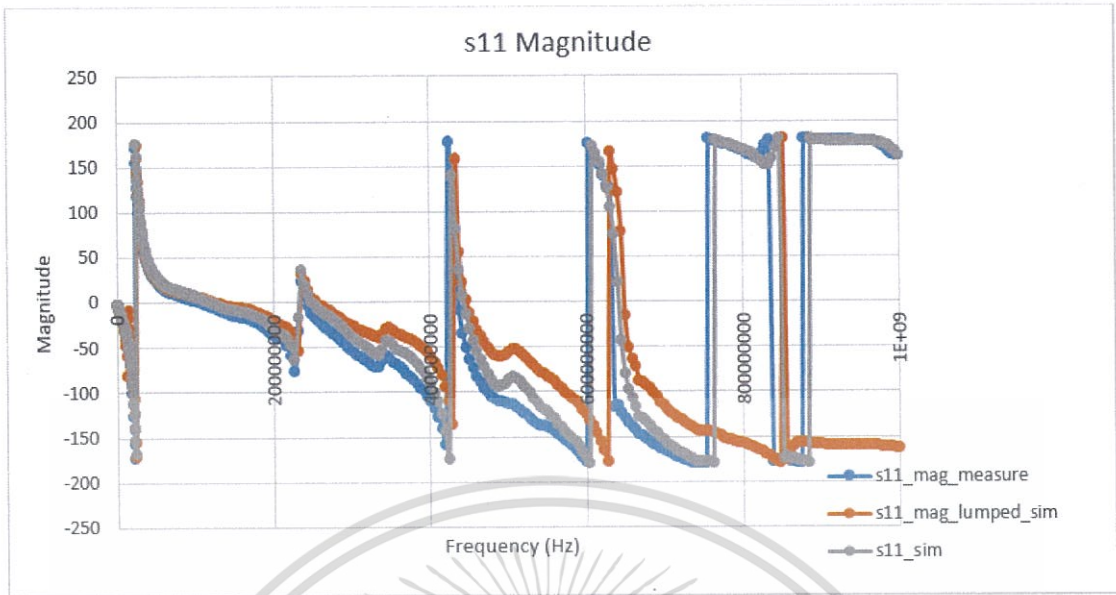
#### 4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์

##### 4.1.2.1 แมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz



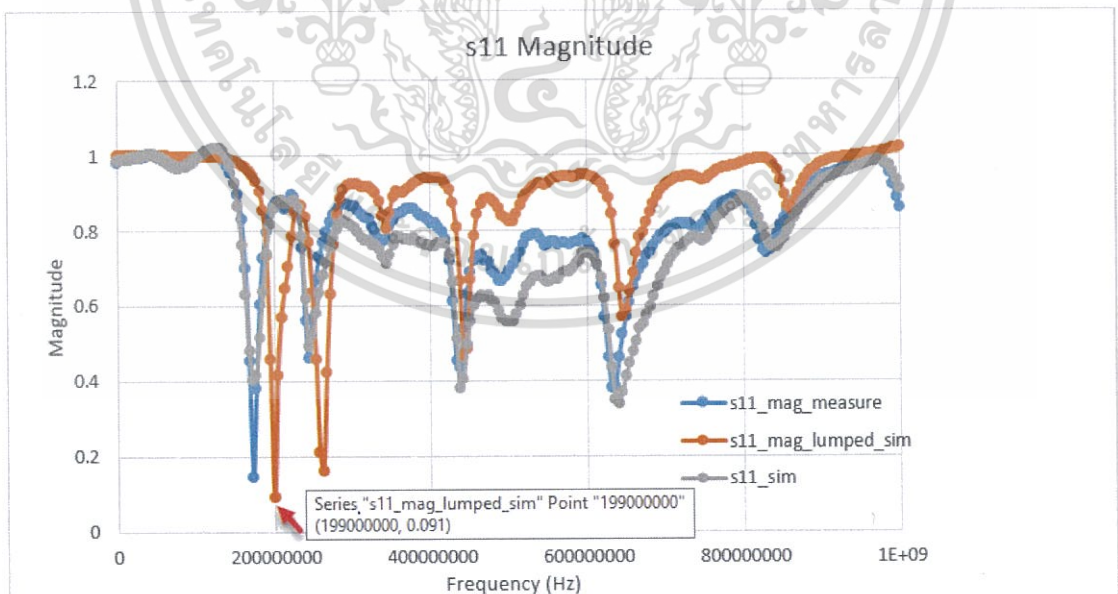
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



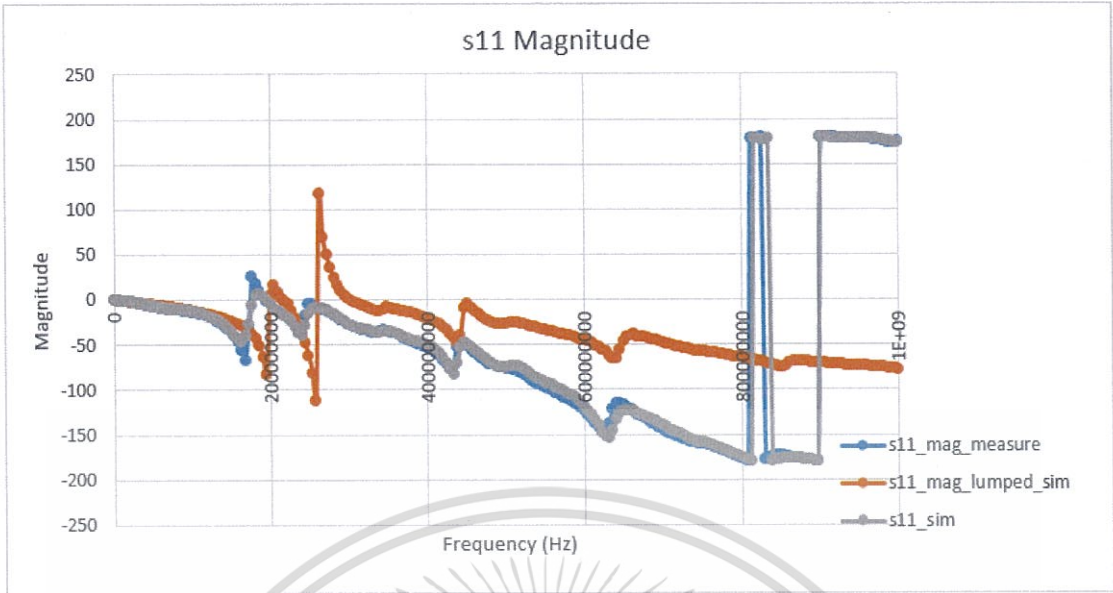
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 14.4 MHz

#### 4.1.2.2 แมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz



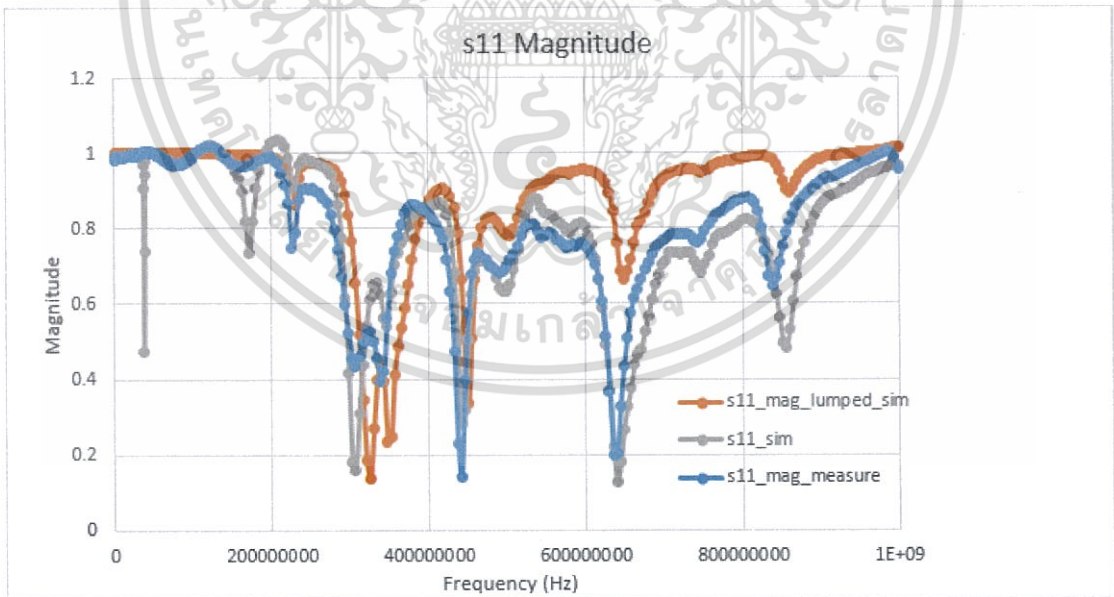
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



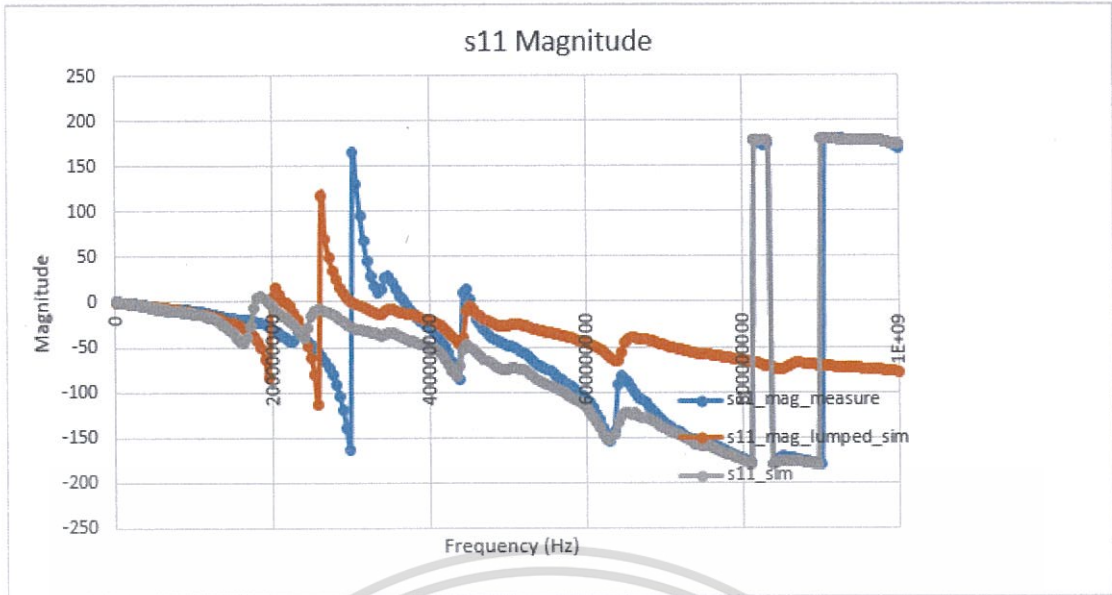
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 198.5 MHz

#### 4.1.2.3 แมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่ของสายอากาศที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 324 MHz

โดยความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์จากการทำแมทชิงอิมพีแดนซ์แบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลความถี่เรโซแนนซ์จากทั้ง 3 วิธีของสายอากาศทั้ง 2 ชนิด

ชนิดของสายอากาศ	ความถี่ที่แมทชิง (MHz)	ความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์ (MHz)		
		วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3
สายอากาศธรรมดา	14.4	14.41	13.66	14.41
	198.5	185.5	190	198.4
	324	334	341	322.8
สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์	14.4	24.08	25.59	14.41
	198.5	172	172	198.4
	324	307	307	324.3

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ที่สายอากาศเกิดการเรโซแนนซ์ของวิธีที่ 1 (ซึ่งได้จากการวัดสายอากาศกับแมทชิงเน็ตเวิร์ค) และวิธีที่ 2 (ซึ่งเป็นการวัดสายอากาศแยกกับแมทชิงเน็ตเวิร์คจากนั้นนำค่า s parameters ทั้งสองมารวมกัน) ของสายอากาศทั้งสองมีผลการเรโซแนนซ์ใกล้เคียงกันโดยค่าเหล่านี้จะมีความคลาดเคลื่อนจากวิธีที่ 3 (การจำลอง) อันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อุปกรณ์พาสซีฟ (ตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ) มีค่าแม่นยำในช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งซึ่งไม่ครอบคลุมช่วงของการทดลองทำให้มีการคลาดเคลื่อนของค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์ทำให้ความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์คลาดเคลื่อนไป
2. อาจเกิดจากการสูญเสียในตัววงจรสายอากาศและแผ่น PCB FR4 ที่ใช้ในการทดลองทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป การทำแมทซิงอิมพีแดนซ์มีประสิทธิภาพน้อยลงทำให้ความถี่ที่เรโซแนนซ์คลาดเคลื่อนได้ทั้งนี้ทั้งนั้นผู้จัดทำสามารถรับความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้

## 4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศ

จากการพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งได้มีการทดสอบโดยการจำลองความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กและการเปรียบเทียบการถ่ายโอนพลังงานระยะใกล้ได้ผลการทดลองดังนี้

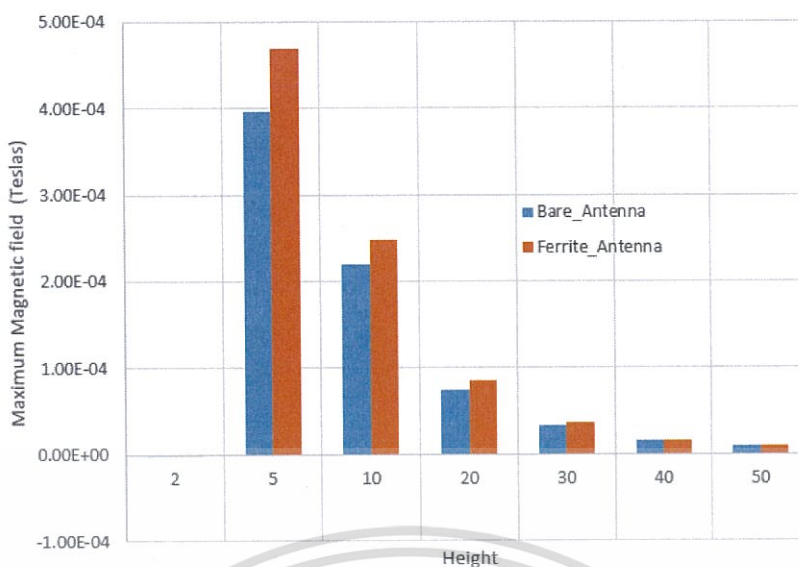
### 4.2.1 ผลการจำลองและเปรียบเทียบสนามแม่เหล็ก

ค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเหนือสายอากาศเป็นระยะ 2, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร แสดงในตารางที่ 4.2 และทำการพล็อตเพื่อเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์แสดงในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของสายอากาศทั้ง 2 ชนิดที่ความสูงต่าง ๆ

ระยะความสูง (mm)	ความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก (Teslas)	
	สายอากาศธรรมดา	สายอากาศแบบมีเฟอร์ไรต์
2	$-6.610 \times 10^{-8}$	$-7.599 \times 10^{-7}$
5	$3.960 \times 10^{-4}$	$4.688 \times 10^{-4}$
10	$2.200 \times 10^{-4}$	$2.475 \times 10^{-4}$
20	$7.430 \times 10^{-5}$	$8.500 \times 10^{-5}$
30	$3.280 \times 10^{-5}$	$3.600 \times 10^{-5}$
40	$1.620 \times 10^{-5}$	$1.620 \times 10^{-5}$
50	$9.260 \times 10^{-6}$	$9.630 \times 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ ของสายอากาศแบบธรรมดา และสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่าสายอากาศแบบธรรมดาในทุกๆระยะความสูงเนื่องจากสารเฟอร์ไรต์ซึ่งเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจากภายนอก (จากสายอากาศที่มีกระแสไหลผ่านเกิดสนามแม่เหล็ก) ทำให้เกิดการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสารเฟอร์โรแมกเนติกทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

#### 4.2.2 ผลเปรียบเทียบการถ่ายโอนพลังงานระยะใกล้

ค่า Transducer power gain ( $G_T$ ) และ Operating power gain ( $G_p$ ) ของสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศที่มีเฟอริไรต์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Advanced design system และจากการวัดแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Power gain ของระบบสายอากาศ

ระยะความสูง (mm)	ชนิดของ สายอากาศ	ผลการจำลอง		ผลการวัด	
		$G_T$	$G_p$	$G_T$	$G_p$
2	ธรรมดา	0.891	0.902	0.559	0.610
	เฟอริไรต์	0.972	0.976	0.652	0.712
5	ธรรมดา	0.874	0.875	0.750	0.765
	เฟอริไรต์	0.873	0.878	0.579	0.588
10	ธรรมดา	0.742	0.745	0.802	0.838
	เฟอริไรต์	0.799	0.800	0.651	0.657

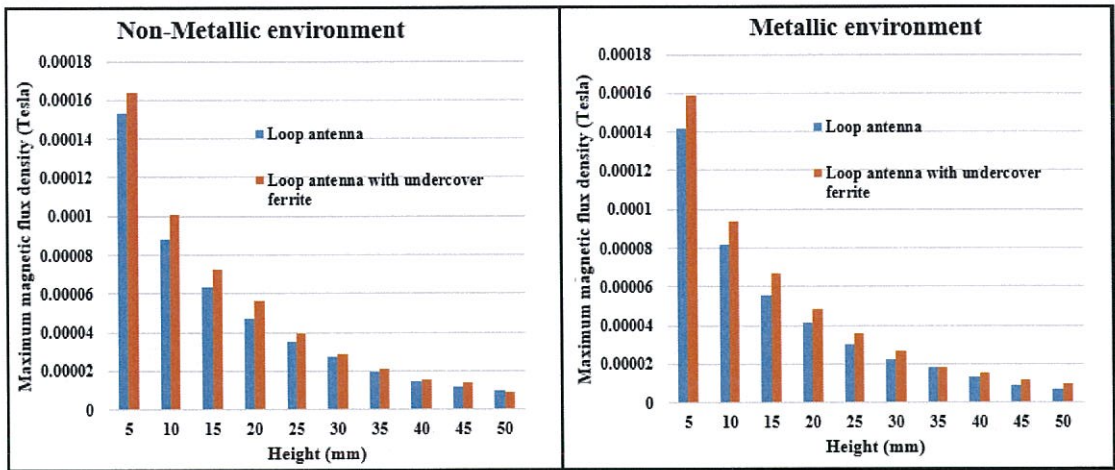
จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบ Transducer power gain ( $G_T$ ) และ Operating power gain ( $G_p$ ) ที่ได้จากการจำลองพบว่าค่า gain ทั้งสองของสายอากาศที่มีเฟอริไรต์มีค่ามากกว่าสายอากาศแบบธรรมดา ในทางกลับกัน ค่า gain ที่ได้จากการวัดจริงของสายอากาศแบบธรรมดามีค่ามากกว่าสายอากาศแบบที่มีเฟอริไรต์ที่ระยะความสูง 5 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งผลการวัดดังกล่าวไม่สอดคล้องกับการจำลอง ซึ่งการผิดพลาดดังกล่าวอาจเกิดจากโมเดลที่ใช้ในการทดลองมีความไม่ถูกต้อง หรืออีกกรณีคือเกิดจากการ coupling ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่งทำให้การส่งผ่านพลังงานที่ได้จากการวัดจริงเกิดความผิดพลาดได้

### 4.3 ผลการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz

จากการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID โดยใช้ Module Pi-931MD ซึ่งขั้นแรก จะทำการจำลองสนามแม่เหล็กของสายอากาศธรรมดาและแบบที่มีเฟอร์ไรต์ได้ผลดังตารางที่ 4.4 จากนั้นได้ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบธรรมดาและแบบที่มีเฟอร์ไรต์เข้ากับเครื่องอ่าน แล้วทำการทดลองที่ 1 คือการวัดระยะการอ่าน Tag สูงสุดที่ได้จากสายอากาศทั้งสองแบบโดยใช้มุมต่าง ๆ จากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำโดยการทดลองที่ 2 คือ ให้เครื่องอ่าน RFID อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะโดยการนำแผ่นทองแดงมาวางคั่นด้วยโฟมหนา 1 เซนติเมตร ได้เครื่องอ่านเพื่อดูระยะการอ่านที่เปลี่ยนแปลงไป โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะต่าง ๆ ของสายอากาศทั้งสองแบบ ในสภาพแวดล้อมที่มีและไม่มีโลหะ

ระยะความสูง (mm)	ค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก (Teslas)			
	สภาพแวดล้อมที่ไม่มีโลหะ		สภาพแวดล้อมที่มีโลหะ	
	สายอากาศธรรมดา	สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์	สายอากาศธรรมดา	สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์
5	$1.54 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$1.42 \times 10^{-4}$	$1.59 \times 10^{-4}$
10	$8.78 \times 10^{-5}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$8.21 \times 10^{-5}$	$9.35 \times 10^{-5}$
15	$6.37 \times 10^{-5}$	$7.24 \times 10^{-5}$	$5.57 \times 10^{-5}$	$6.67 \times 10^{-5}$
20	$4.71 \times 10^{-5}$	$5.61 \times 10^{-5}$	$4.13 \times 10^{-5}$	$4.88 \times 10^{-5}$
25	$3.52 \times 10^{-5}$	$3.93 \times 10^{-5}$	$2.99 \times 10^{-5}$	$3.58 \times 10^{-5}$
30	$2.72 \times 10^{-5}$	$2.88 \times 10^{-5}$	$2.24 \times 10^{-5}$	$2.66 \times 10^{-5}$
35	$1.96 \times 10^{-5}$	$2.07 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{-5}$
40	$1.46 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-5}$	$1.28 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-5}$
45	$1.17 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-5}$	$9.22 \times 10^{-6}$	$1.19 \times 10^{-5}$
50	$9.36 \times 10^{-6}$	$8.75 \times 10^{-6}$	$7.00 \times 10^{-6}$	$9.51 \times 10^{-6}$



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.14 แสดงค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ระยะความสูงต่าง ๆ ของสายอากาศสองชนิด (ก) สภาพแวดล้อมที่ไม่มีโลหะ (ข) สภาพแวดล้อมที่มีโลหะ

จากรูปที่ 4.14 ที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิเมตร สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าสายอากาศธรรมดาทั้งสภาพแวดล้อมที่มีโลหะและไม่มีโลหะ

ตารางที่ 4.5 แสดงระยะการอ่าน Tag สูงสุดที่มุมต่าง ๆ ของเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศแบบธรรมดา

สายอากาศ ธรรมดา	ระยะการอ่านสูงสุดที่มุม Tag ต่าง ๆ (cm.)			
	0°	30°	45°	60°
การทดลองที่ 1	3.2	3.1	2.8	1.6
การทดลองที่ 2	2.5	2.3	1.9	1.5

ตารางที่ 4.6 แสดงระยะการอ่าน Tag สูงสุดที่มุมต่าง ๆ ของเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์

สายอากาศที่มี เฟอร์ไรต์	ระยะการอ่านสูงสุดที่มุม Tag ต่าง ๆ (cm.)			
	0°	30°	45°	60°
การทดลองที่ 1	5.2	4.9	4.5	4
การทดลองที่ 2	5.3	5.1	4.7	4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการทำอิมพีแดนซ์แมทชิ่งสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์ให้  
 ระยะการอ่าน Tag ของเครื่องอ่าน RFID ได้มากกว่าเครื่องอ่านที่ใช้สายอากาศแบบธรรมดาและช่วย  
 ลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีโลหะได้ดีกว่าเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศแบบธรรมดาซึ่ง  
 สอดคล้องกับผลการจำลองสนามแม่เหล็กของสายอากาศที่สายอากาศแบบมีเฟอร์ไรต์ให้ค่าความ  
 หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าสายอากาศแบบธรรมดาทั้งสภาพแวดล้อมที่มีโลหะและไม่มีโลหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

โครงการนี้เป็นโครงการศึกษาเพื่อพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ 13.56 MHz โดยการใช้สารเฟอร์ไรต์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอ่าน Tag สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมได้ ซึ่งก่อนทำการใช้สายอากาศกับเครื่องอ่านได้นั้นจำเป็นต้องทำอิมพีแดนซ์แมทชิงเพื่อให้เครื่องอ่านส่งผ่านพลังงานไปที่สายอากาศได้สูงสุดและจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศธรรมดาและสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์โดยการจำลองและการวัดค่าจริง โดยขั้นแรกจะเป็นการศึกษาการทำอิมพีแดนซ์แมทชิงของสายอากาศแบบ Single ended ให้สายอากาศเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต้องการซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถทำการแมทชิงให้สายอากาศทั้งสองชนิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต้องการได้แต่จะมีความคลาดเคลื่อนนิดหน่อยอันเกิดจากตัวอุปกรณ์ (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) ซึ่งมีช่วงการทำงานไม่ตรงกับความถี่ที่ทดลองและอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการสูญเสียในวงจรสายอากาศและแผ่น PCB โดยผลการจำลองนั้นสายอากาศจะเรโซแนนซ์ได้ตรงกับความถี่ที่ต้องการ

ในส่วนของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศทั้งสองจะเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่สายอากาศปล่อยออกมาในระยะความสูง 2, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรซึ่งผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์ให้ค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่าสายอากาศแบบธรรมดาในทุกระยะความสูง ส่วนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานระยะไกลนั้นได้ทำการนำสายอากาศที่เหมือนกันสองตัวเพื่อใช้เป็นสายอากาศตัวรับและตัวส่งจากนั้นทำการจำลองและวัดค่า Transducer power gain ( $G_T$ ) และ Operating power gain ( $G_p$ ) ที่ระยะห่างของสายอากาศทั้งสองเท่ากับ 2, 5, และ 10 มิลลิเมตร จากการจำลองพบว่าสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์ให้ค่า gain ทั้งสองสูงกว่าสายอากาศแบบธรรมดา แต่ผลจากการวัดจริงสายอากาศที่มีแผ่นเฟอร์ไรต์ให้ค่า gain ทั้งสองต่ำกว่าสายอากาศแบบธรรมดาที่ระยะ 5 และ 10 มิลลิเมตร สาเหตุอาจเกิดจากโมเดลที่ใช้ในการทดลองมีความไม่ถูกต้อง หรืออีกกรณีคือเกิดจากการ coupling ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่งทำให้การส่งผ่านพลังงานที่ได้จากการวัดจริงเกิดความผิดพลาดได้

ส่วนสุดท้ายจะเป็นการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้กับเครื่องอ่าน RFID ซึ่งสายอากาศที่ใช้จะเป็นแบบ Differential ซึ่งจะมีวิธีการทำแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างไปจากสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์แบบ Single ended ในการทดลองนี้จะเปรียบเทียบระยะการอ่าน Tag ที่มีมุมของ Tag 0, 30, 45 และ 60 องศา ของเครื่องอ่าน RFID ที่มีสายอากาศแบบธรรมดาและสายอากาศแบบที่มีเฟอร์ไรต์ในสองสภาพแวดล้อมคือ สภาพแวดล้อมแบบไม่มีโลหะและสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์มีระยะการอ่านที่มากกว่าเครื่องอ่าน RFID ที่ใช้สายอากาศแบบธรรมดาและยังมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศแบบธรรมดาเมื่อเครื่องอ่านอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ โดยผลการจำลองสนามแม่เหล็กของสายอากาศทั้งสองด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell ที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิเมตรผลที่ได้คือสายอากาศที่มีเฟอร์ไรต์มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าสายอากาศธรรมดาในทุกระยะที่ทำการจำลองซึ่งผลการจำลองกับผลการวัดจริงที่ได้มีความสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานได้แก่

- การทำแมทซิงเน็ตเวิร์คต้องใช้อุปกรณ์ (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) ที่มีความหลากหลาย การมีค่าของอุปกรณ์ไม่มากพอทำให้เกิดความยากลำบากในการหาค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ลงตัวพอดีในการทำแมทซิงอิมพีแดนซ์
- ค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีความคลาดเคลื่อนทำให้ผลการวัดการเรโซแนนซ์ของสายอากาศมีความคลาดเคลื่อน
- การวัดค่า s parameters จากเครื่อง Network analyzer ทำได้ยากเพราะต้องนำค่าที่วัดได้มาทำการลบค่า s parameters ของหัวเชื่อมต่อ SMA ด้วยโปรแกรม MATLAB ทำการวัดค่าแต่ละครั้งใช้เวลานาน
- การศึกษาการทำอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ Differential ซึ่งใช้กับเครื่องอ่าน RFID มีความยุ่งยากซับซ้อนและต้องใช้ในการ try and error จึงทำให้ใช้เวลากับส่วนนี้มาก

## 5.3 แนวทางในการพัฒนา

- ศึกษาและพัฒนากการส่งผ่านพลังงานระยะใกล้ของสายอากาศ
- พัฒนาเครื่องอ่าน RFID ที่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยสารเฟอร์ไรต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในด้านอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ประโยชน์ คำสวัสดิ์. 2555. “การแสดงตัวตนและระบุตำแหน่งรถไฟฟ้าโดยใช้ RFID.” รายงานการวิจัยสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [2] บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์. 2017. วิศวกรรมไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] อิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์. 2017. [Online].  
Available: <http://icelectronic.com/beginner/study/imped.htm>.
- [4] จิตรยุทธ. 2014. การแมทชิงอย่างไร. [Online].  
Available: <http://www.e20ae.org/Articles-11.html>.
- [5] Gonzalez, G. (1996). **Microwave transistor amplifiers: Analysis and design.** 2<sup>nd</sup> ed. New York: Pearson Education.
- [6] Pozar, D. 2004. **Microwave engineering (international edition).** 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- [7] วรพจน์ เสรีรัฐ, อนิรุท ไชยจรรูณิช, วสวัชร นาคเขี้ยว และ ชนม์เจริญ แสงรัตน์. (2017). **Magnetic Properties.** [Online].  
Available: [http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014\\_08/14/บทที่%205%20Magnetic%20Properties.pdf](http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014_08/14/บทที่%205%20Magnetic%20Properties.pdf).
- [8] Cullity, B. and Graham, C. (2009). **Introduction to magnetic materials.** Hoboken: John Wiley & Sons.
- [9] **Module Datasheet Pi-931MD.** 2010. Silicon Craft.
- [10] Thantipwan, T. 2010. **Application Note HF RFID Antenna Matching Design.** Silicon Craft.

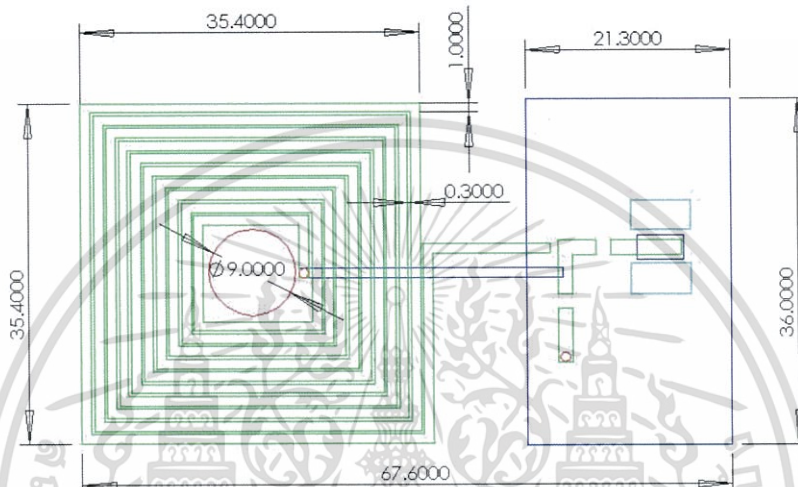


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

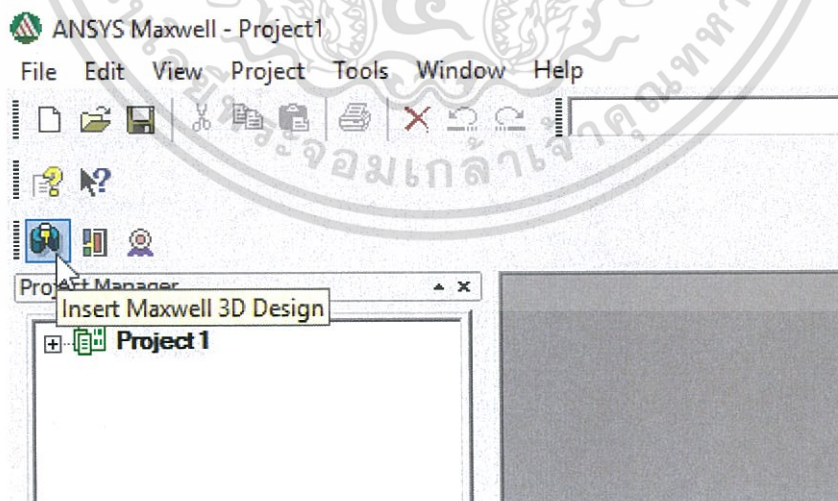
## ภาคผนวก ก

### 1. การจำลองสนามแม่เหล็กของสายอากาศด้วยโปรแกรม ANSYS Maxwell

1. สร้าง Layout ของสายอากาศโดยมีขนาดดังรูป ในหน่วยมิลลิเมตรแล้วบันทึกสกุลไฟล์เป็น .dxf

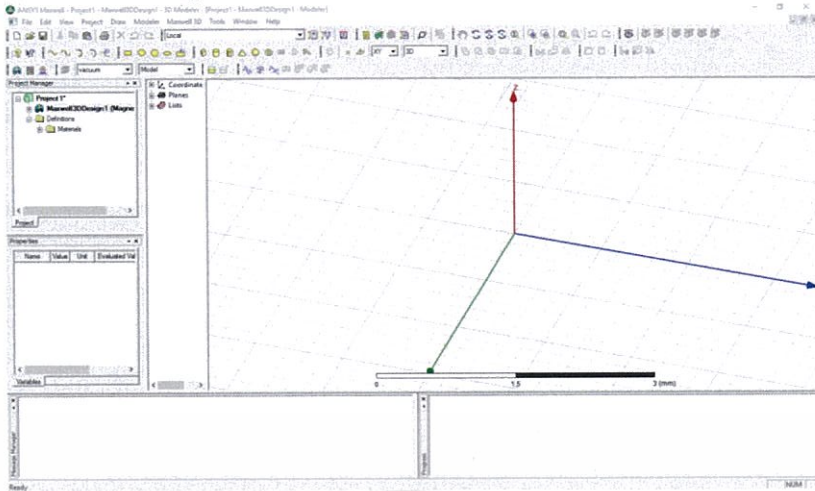


2. เปิดโปรแกรม ANSYS Maxwell แล้วคลิกที่ Insert Maxwell 3D Design

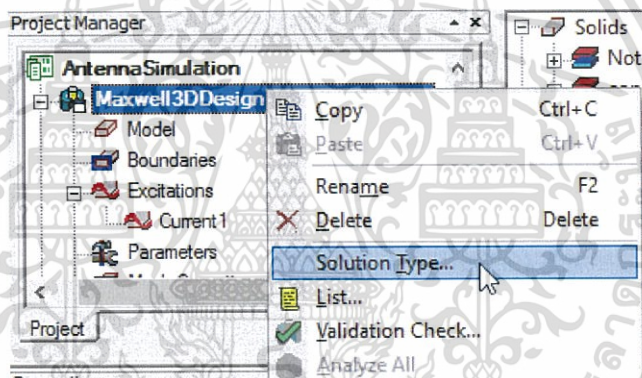


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

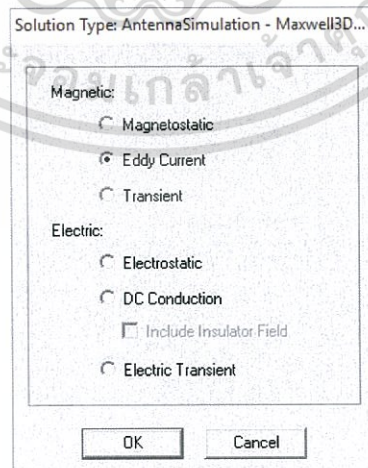
จะได้หน้าต่างดังรูป



- ที่หน้าต่าง Project manager คลิกขวาที่ Maxwell3DDesign1 >> Solution Type เพื่อตั้งค่ารูปแบบการ simulation

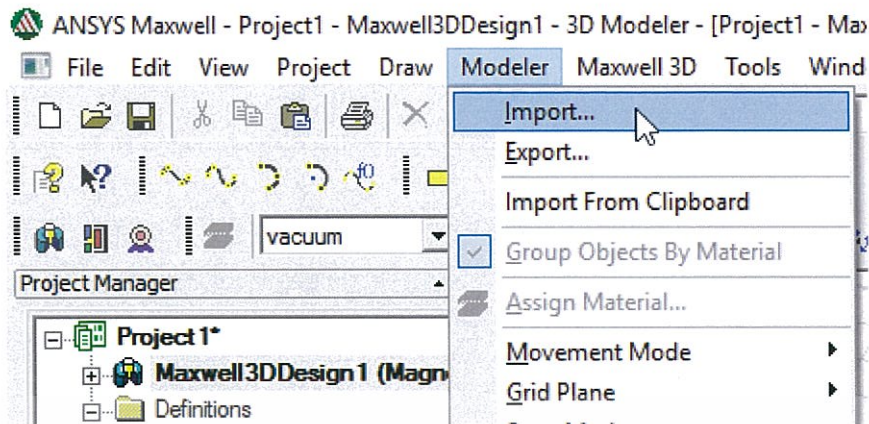


- เลือกชนิด Solution เป็น Eddy Current >> OK

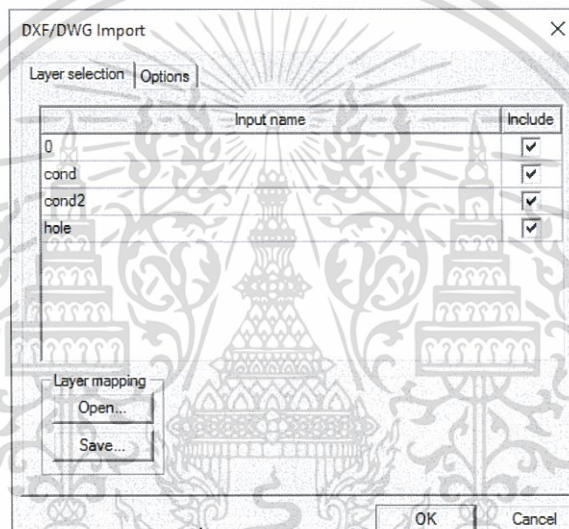


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่แถบเมนูเลือก Modeler >> Import จากนั้นเลือกไฟล์สายอากาศที่บันทึกไว้



- จะได้หน้าต่างดังนี้ จากนั้นให้ทำการกด open... เพื่อเลือกไฟล์ Layer mapping



- ซึ่งไฟล์ Layer mapping เป็นไฟล์ .tech เพื่อใช้ระบุขนาดความสูงของ Layer แต่ละชั้น เมื่อทำการเปิดไฟล์ด้วย notepad จะมีเนื้อหาภายในดังนี้

units mm

//

// Layer Color Elevation Thickness

// Name Purpose [mm] [mm]

//-----

cond brown 1.635 0.035

hole green 0.035 1.6

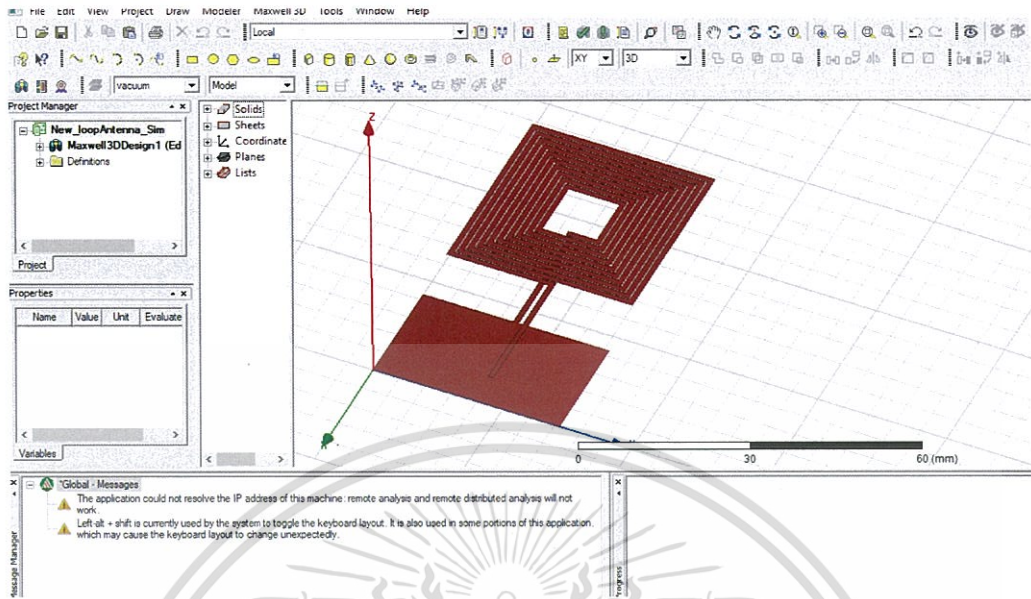
cond2 brown 0 0.035

spacer grey -0.035 0

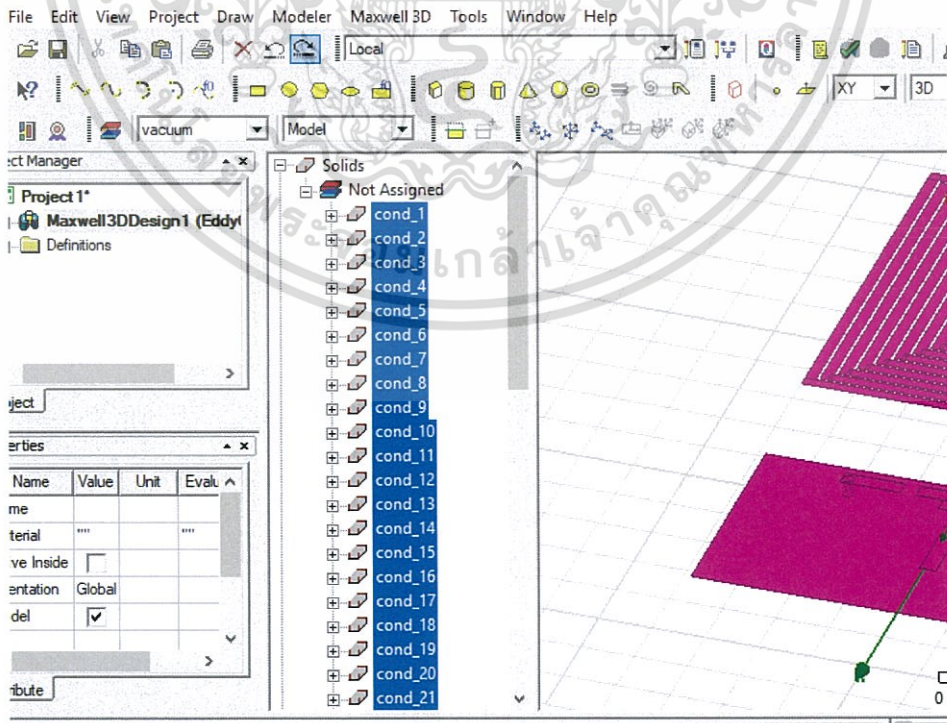
ferrite yellow -0.135 -0.035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อเลือกไฟล์เสร็จจากนั้นกด OK จะได้หน้าต่างที่มีสายอากาศดังรูป

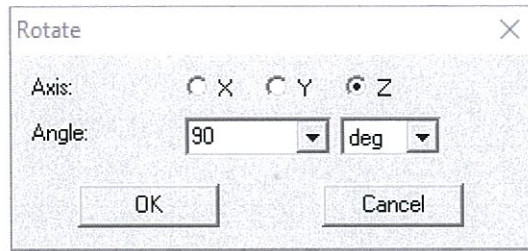


4. จะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ Import มาจะไม่เป็นชิ้นเดียวกัน จึงต้องทำการเลือกชิ้นส่วนทั้งหมดของสายอากาศ และไปที่ Modeler >> Boolean >> Unite

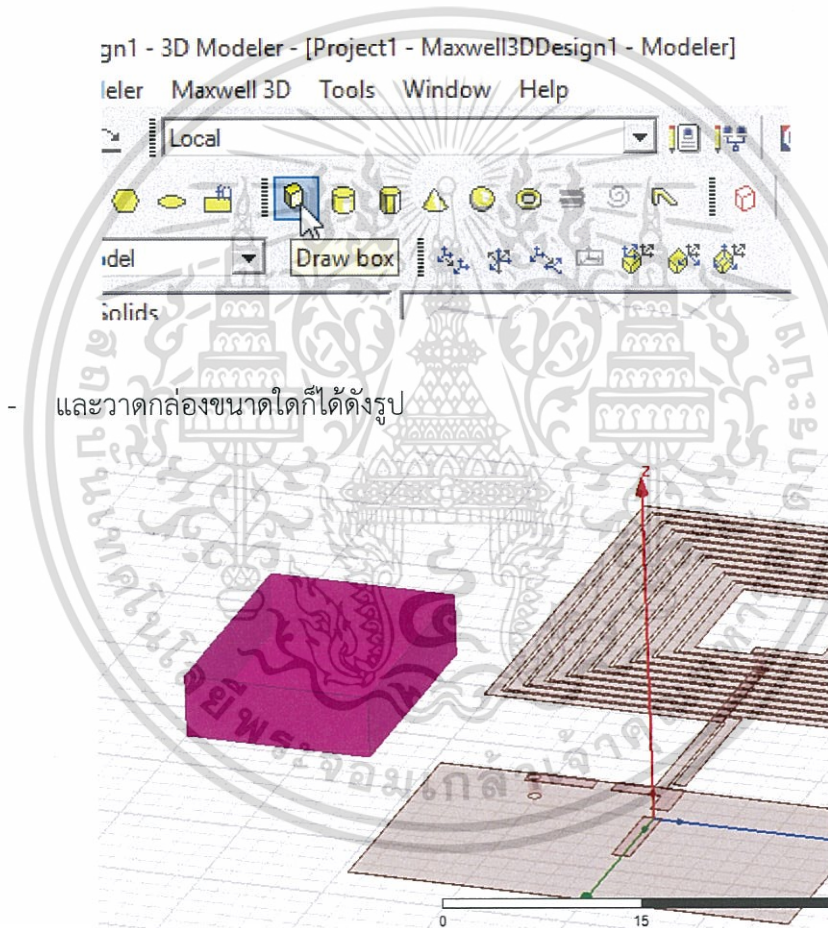


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการหมุนโมเดล โดยไปที่ Edit >> Arrange >> Rotate >> OK (ใช้ในกรณีที่สายอากาศที่ Import เข้ามาวางแนวไม่ตรงตามความต้องการ โดยผู้จัดทำจะวางแนวของส่วนบนของสายอากาศให้ชี้ไปทางแกน -x)

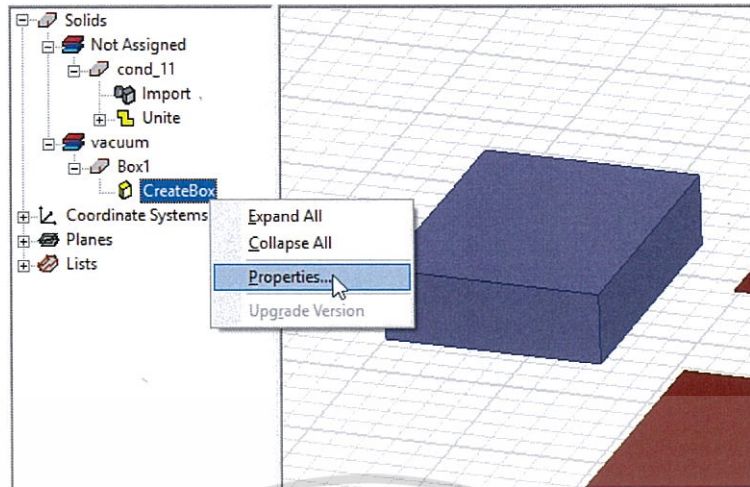


6. ทำการวาดแผ่นปรีนที่อยู่ระหว่างสายอากาศ โดยคลิกที่คำสั่ง Draw Box

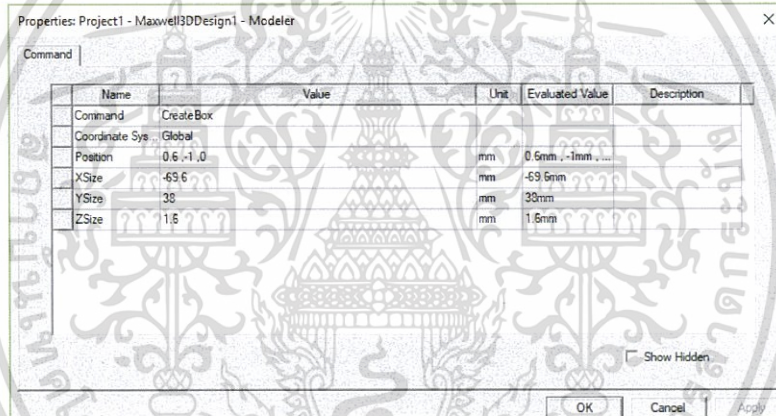


- และวาดกล่องขนาดใดก็ได้ตั้งรูป

- ทำการปรับขนาดกล่องโดยคลิกขวาที่ชื่อกล่องที่สร้าง >> Edit >> Properties

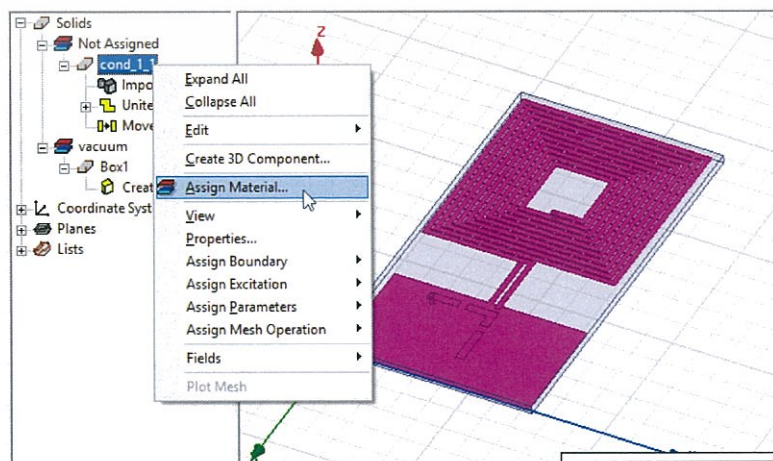


- จากนั้นใส่ค่าตั้งรูปจะทำให้ตำแหน่งของกล่องตรงกับสายอากาศพอดี



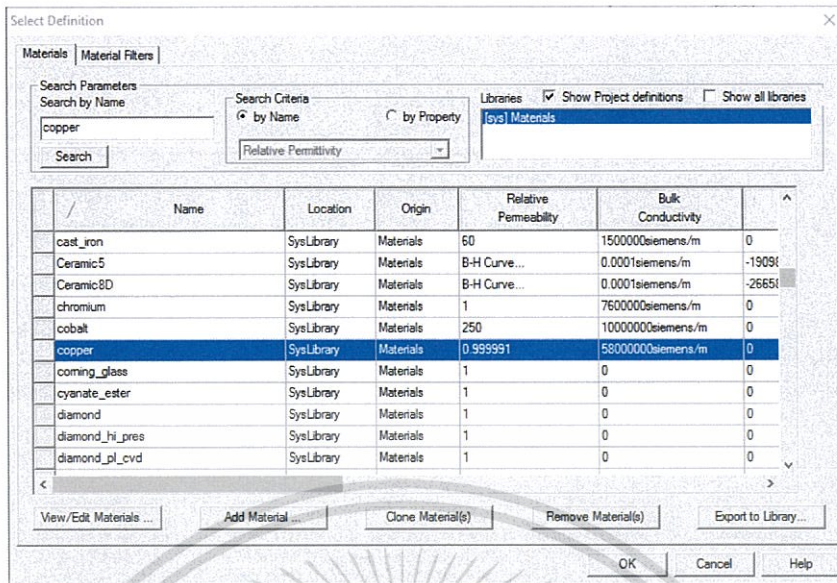
## 7. จากนั้นทำการกำหนด Material ของสายอากาศและแผ่น PCB

- คลิกขวาที่ con\_1\_1 >> Assign Material

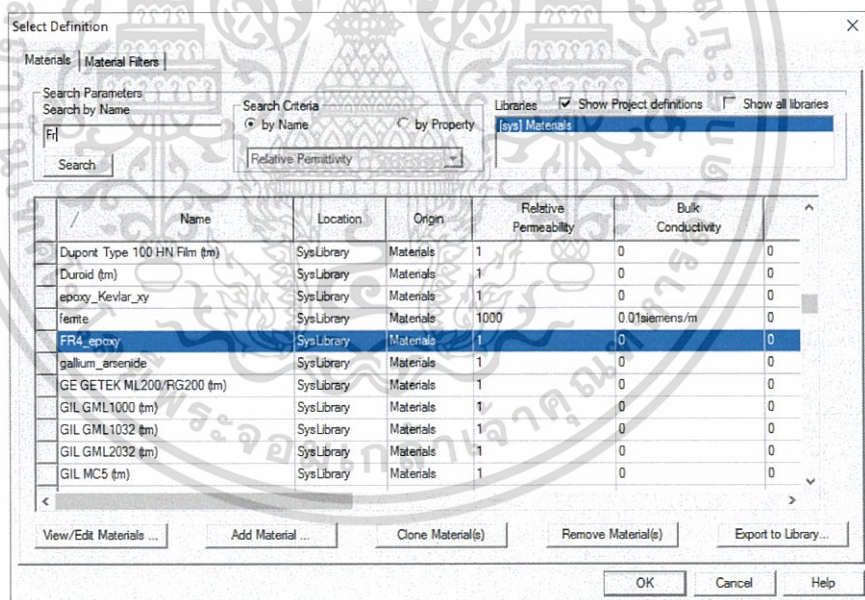


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก Material เป็น copper

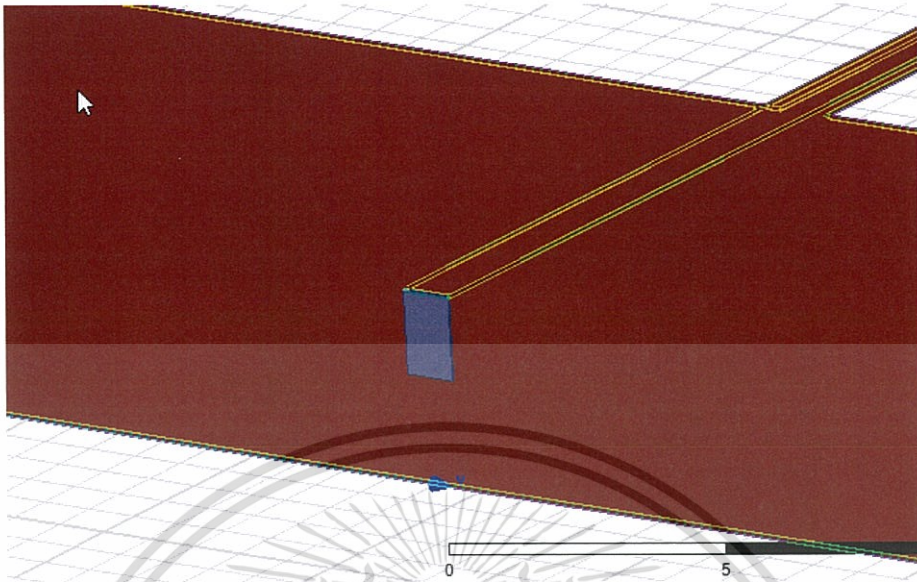


- เลือก Box1 คลิกขวา Box1>>Assign Material เลือก Material เป็น FR4\_epoxy >>OK

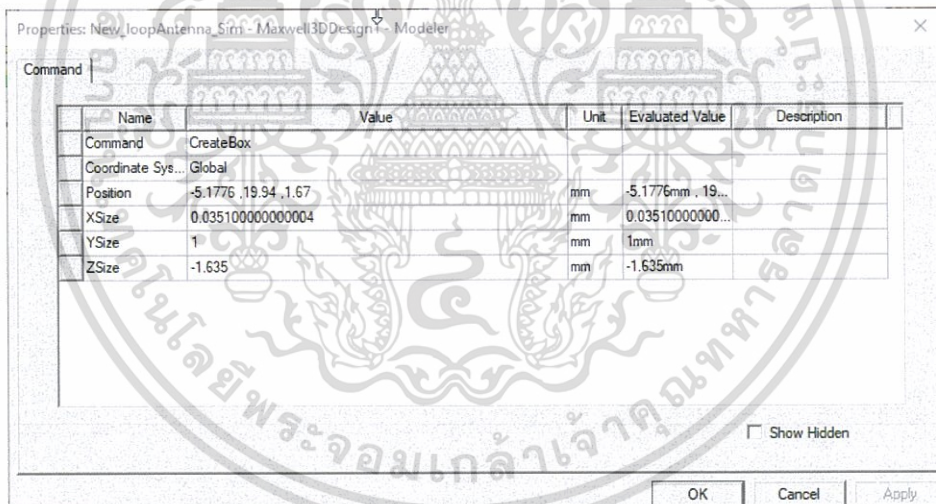


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. จากนั้นทำการวาดเส้นตัวนำเชื่อมระหว่างขาของสายอากาศและ Ground Plane เข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องมือ Draw Box



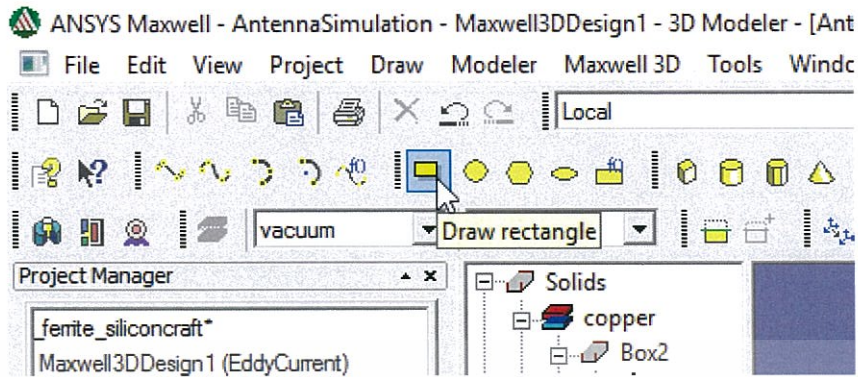
- โดยมีขนาดดังนี้



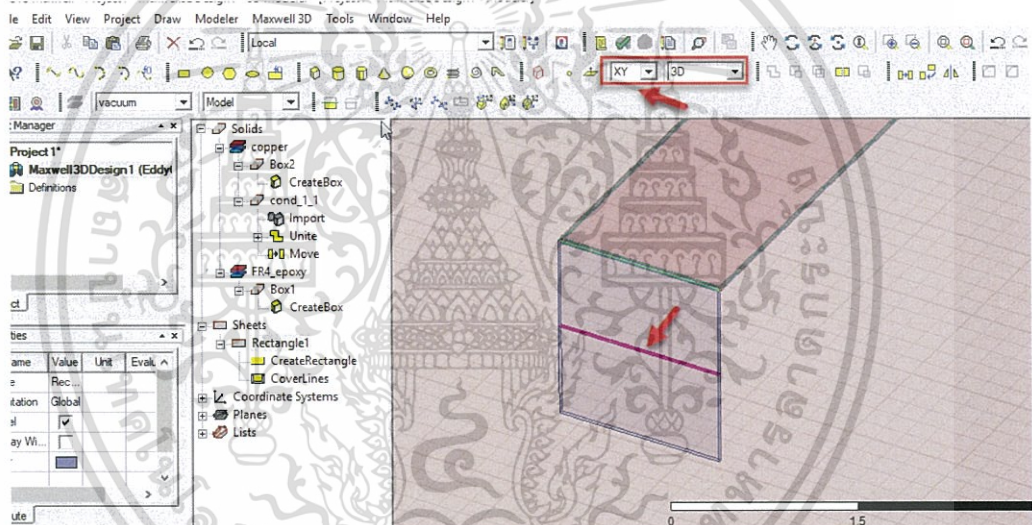
- เลือก Material เป็น copper โดยคลิกขวาที่ Box2>>Assign Material เลือก copper >> OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

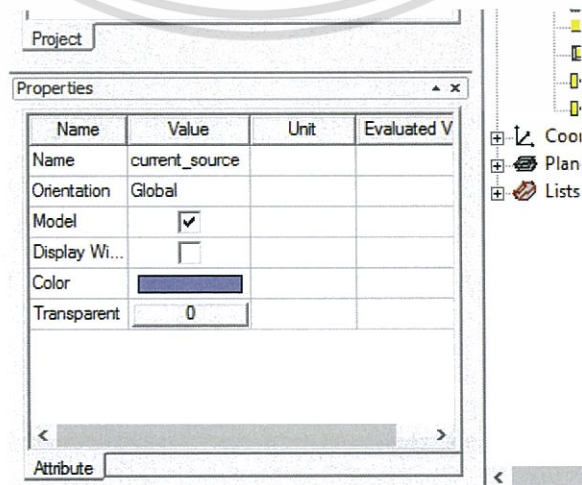
9. สร้าง Plane เพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการกำหนดทิศทางการจ่ายกระแสให้กับสายอากาศ โดยใช้เครื่องมือ Draw rectangle



- ที่แถบด้านบนเปลี่ยน plane การวาดเป็น plane XY ละวาดรูปสี่เหลี่ยมให้ขนาดเท่าหน้าตัดตัวนำ

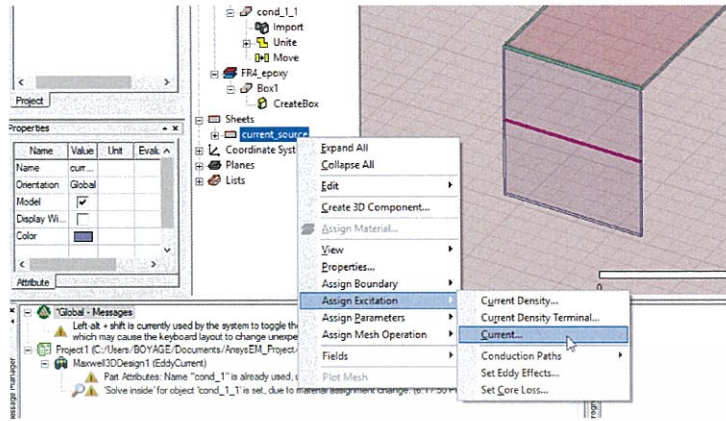


- และเปลี่ยนชื่อ Rectangle1 เป็น current\_source

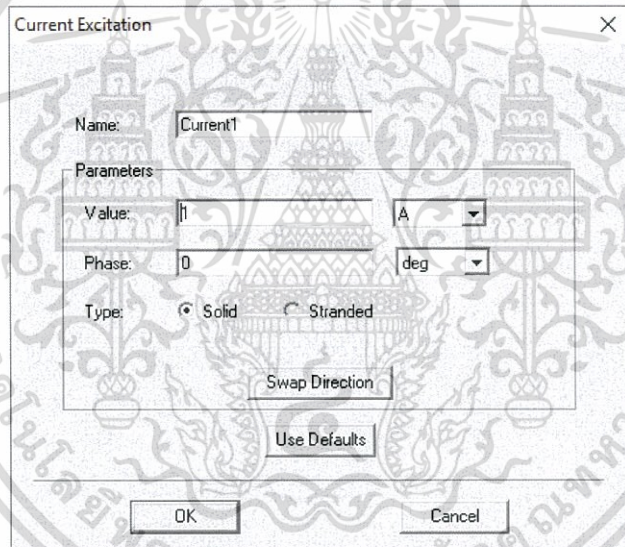


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการใส่ excitation ให้กับ current\_source โดยคลิกขวาที่ current\_source>>Assign Excitation>>Current...

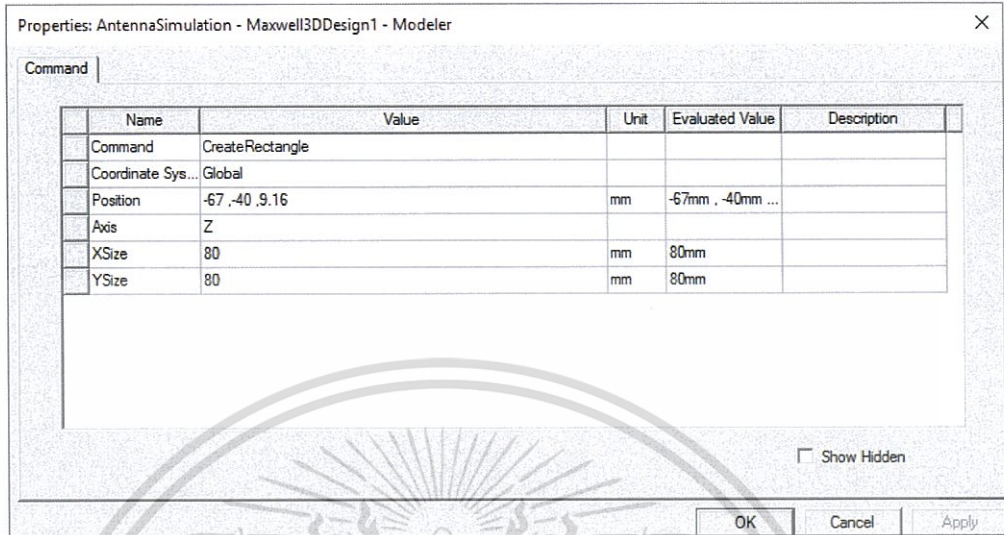


- จะได้หน้าต่างดังรูป และใส่กระแสเท่ากับ 1 A >> OK

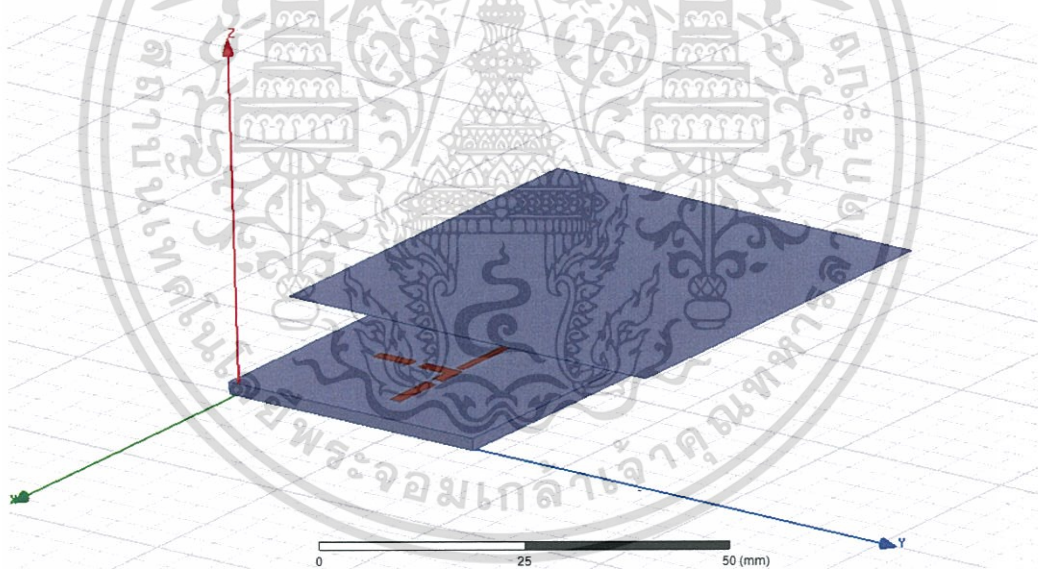


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการสร้าง plane ไว้เพื่อตรวจสอบความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ถูกปล่อยออกมาจากสายอากาศ ที่ระยะ 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องมือ Draw rectangle วัตถุสี่เหลี่ยมตั้งรูป

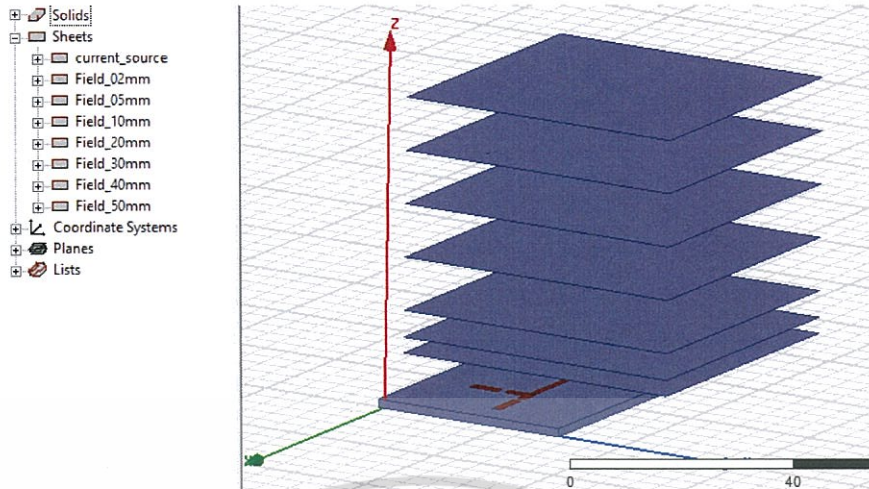


- และเปลี่ยนชื่อเป็น Field\_2mm จะได้สี่เหลี่ยมตั้งรูป

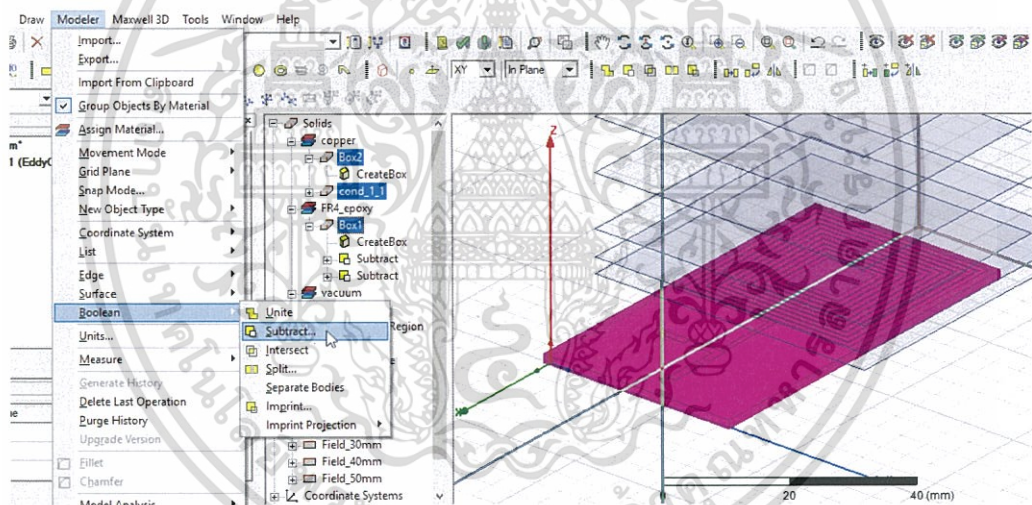


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากนั้นทำซ้ำแบบเดิมจนครบจะได้ดังรูป

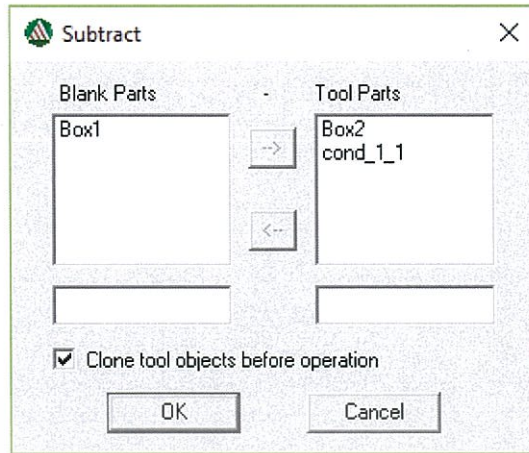


11. ทำการลบส่วนที่ทับซ้อนกันของสายอากาศและแผ่น FR4 โดยการคลิกเลือก Box1, Box2 และ cond\_1\_1 แล้วไปที่ Modeler>>Boolean>>Subtract

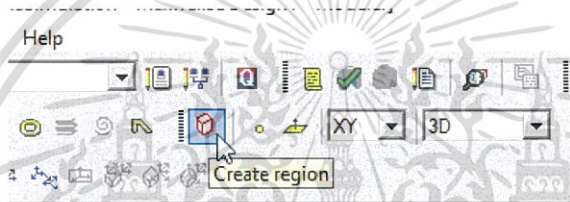


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

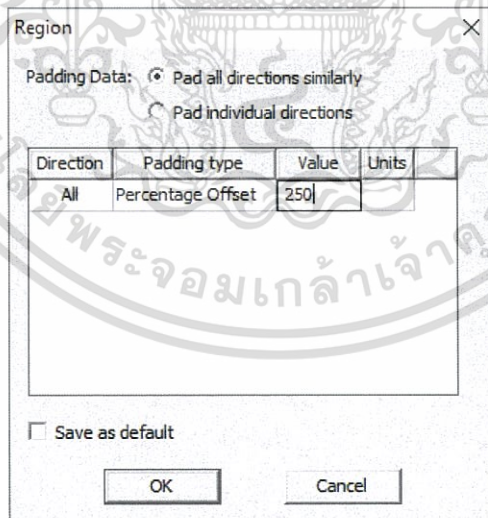
- ทำการลบ cond\_1\_1 และ Box2 ออกจาก Box1



12. ทำการสร้าง region ที่เป็น vacuum คลุมสายอากาศโดยใช้เครื่องมือ Create region

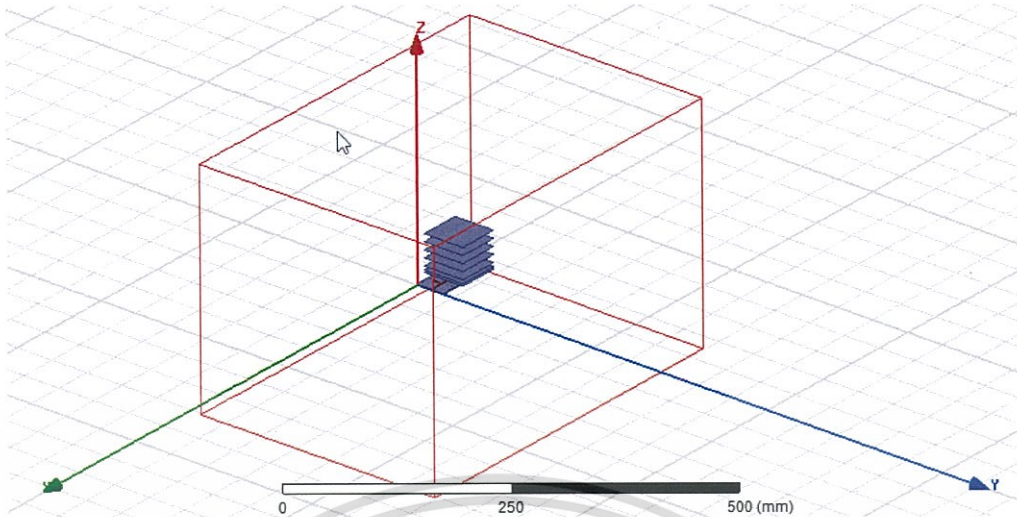


- ใส่ percent offset เป็น 250 >> OK

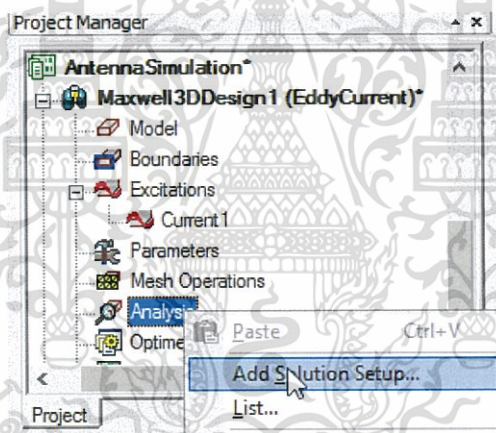


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จะได้ vacuum region ดังรูป



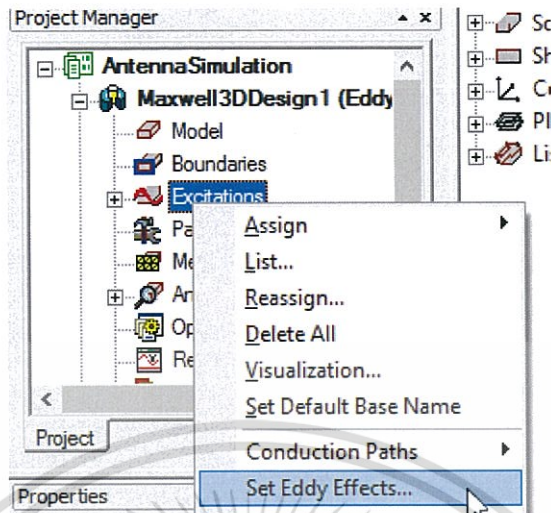
13. ทำการ Setup การ simulation ที่หน้าต่าง Project Manager >> Maxwell3DDesign1>> คลิกขวาที่ Analysis >> Add Solution Setup...



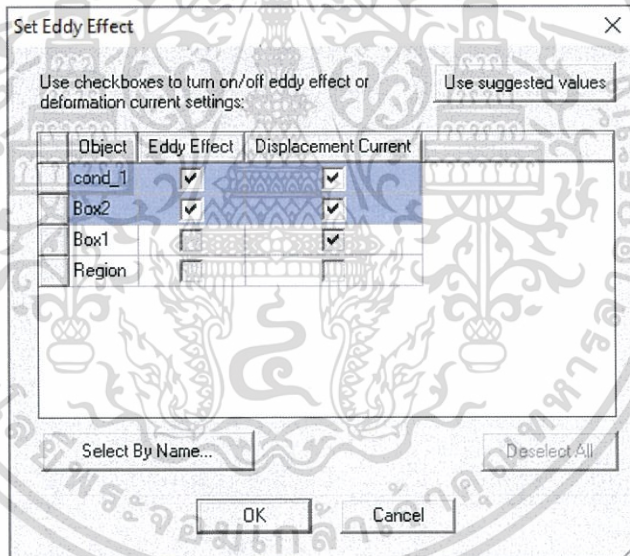
- ที่แถบ General ใส่ค่า Maximum Number of Passes : 20
- ที่แถบ Solver ใส่ค่า Adaptive Frequency : 13.56 MHz จากนั้นกด OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

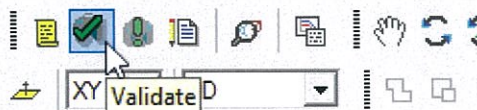
- ที่ Project Manager >> Maxwell3DDesign1>> คลิกขวาที่ Excitation >> Set Eddy Effect...



- check ที่ Displacement Current ดังรูป

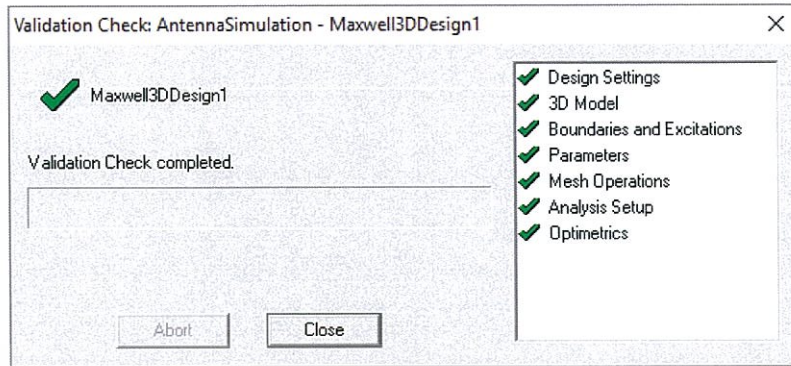


14. ทำการตรวจสอบความถูกต้องของ model โดยคลิกที่

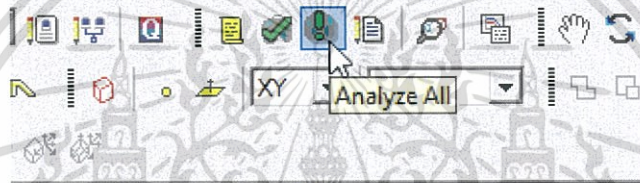


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

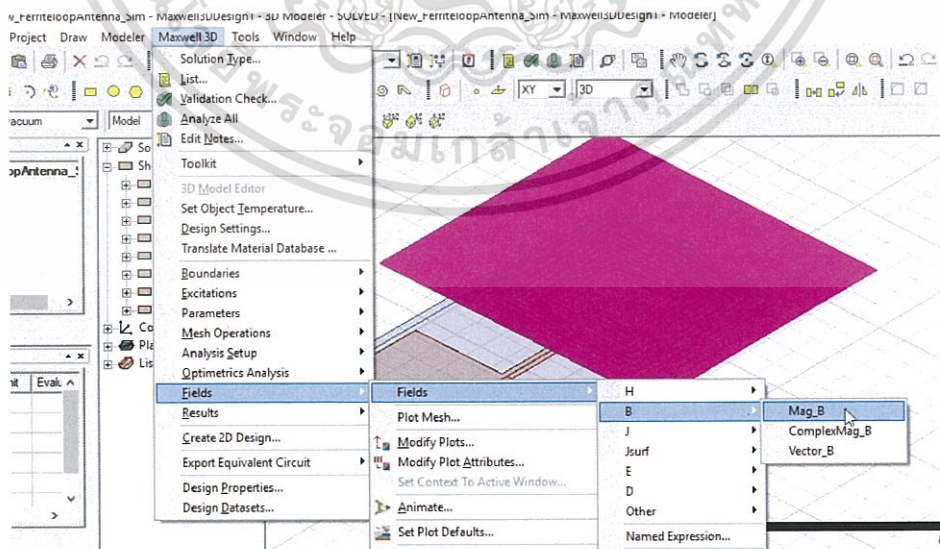
- จะได้หน้าต่างดังรูป ถ้ามีเครื่องหมายถูกสีเขียวทั้งหมดแสดงว่า model มีความถูกต้อง การตั้งค่าครบถ้วนพร้อมที่จะทำการ Simulation



### 15. เริ่มการ Simulation โดยคลิกที่คำสั่ง Analyze All

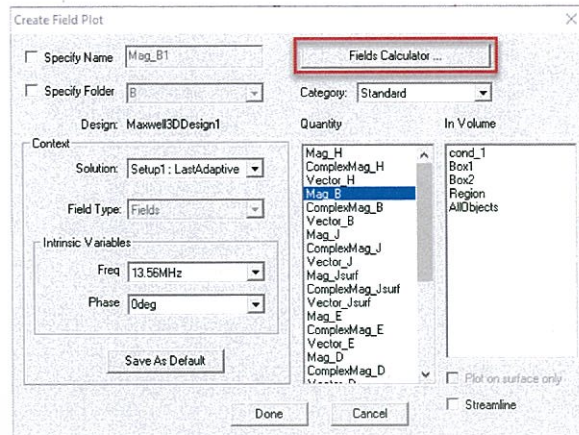


- 16. เมื่อทำการ Analyze เสร็จเรียบร้อยขั้นตอนต่อไปจะเป็นการหาค่าขนาดสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยเลือก Plane อ่างอิงที่ใส่ไว้ที่ระดับต่าง ๆ เช่น คลิกเลือก Field\_5mm จากนั้นไปที่แถบเมนู Maxwell 3D >> Fields >> Fields >> B >> Mag\_B

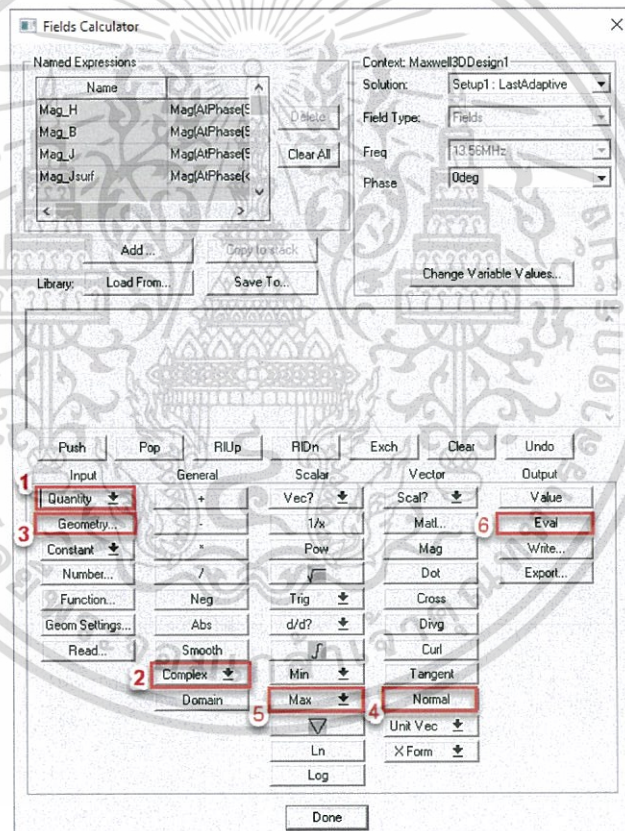


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จะปรากฏหน้าต่างดังรูป เข้าไปที่ Fields Calculator...



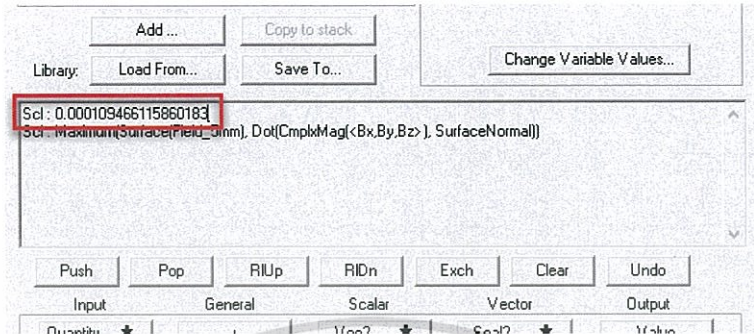
- จะได้หน้าต่างดังรูป จากนั้นทำตามขั้นตอนดังนี้



- 1. คลิกที่ Quantity >> B
- 2. ที่ Complex >> CmplxMag
- 3. ที่ Geometry >> Surface >> Field\_5mm >> OK
- 4. คลิกที่ Normal เพื่อหาสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับ Field\_5mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

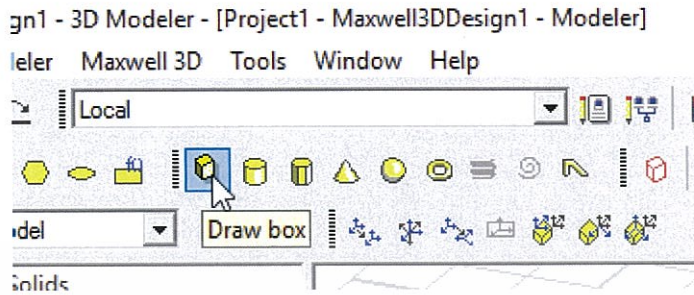
- 5. เลือก Max >> Value เพื่อดูค่าสูงสุด
- 6. เลือก Eval จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังรูป



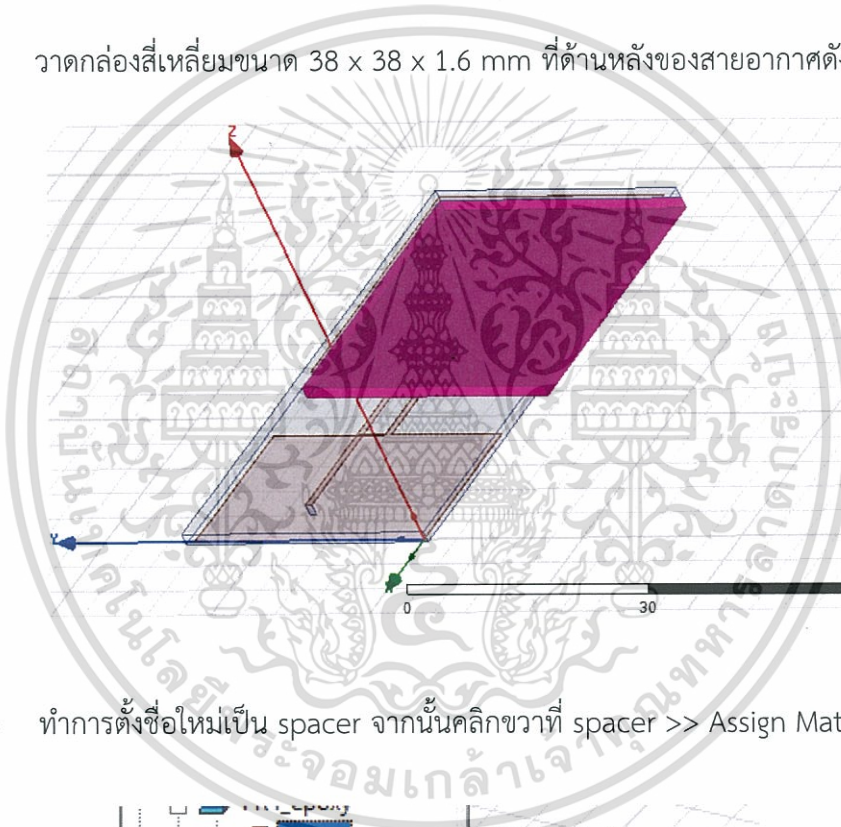
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การเพิ่มสาร Ferrite ในแบบจำลองสายอากาศ

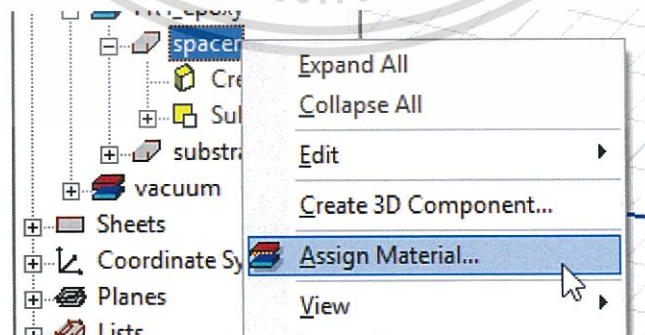
1. ทำการวาดแผ่น FR4 ที่อยู่ระหว่างสายอากาศกับแผ่น Ferrite โดยคลิกที่คำสั่ง Draw Box



- วาดกล่องสี่เหลี่ยมขนาด  $38 \times 38 \times 1.6$  mm ที่ด้านหลังของสายอากาศดังรูป

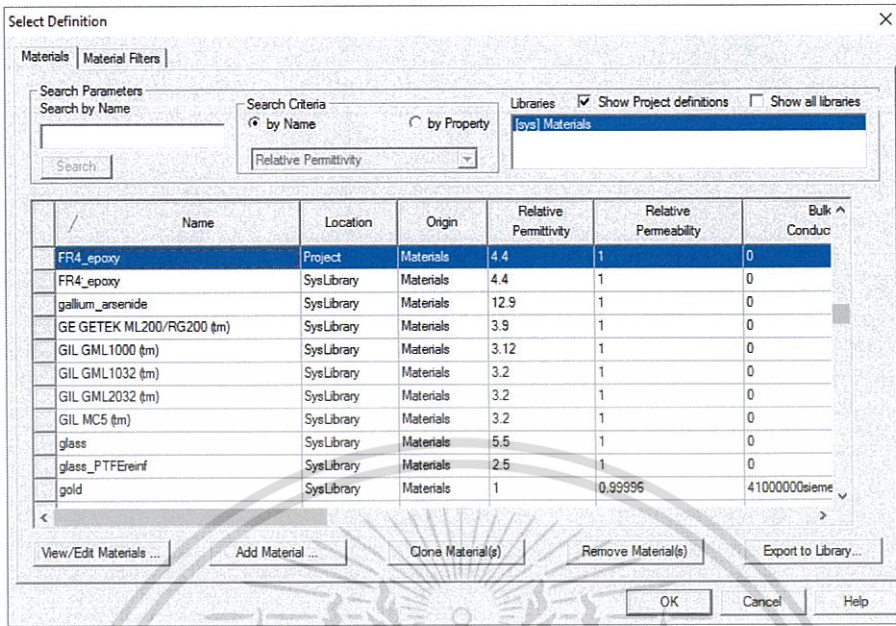


- ทำการตั้งชื่อใหม่เป็น spacer จากนั้นคลิกขวาที่ spacer >> Assign Material

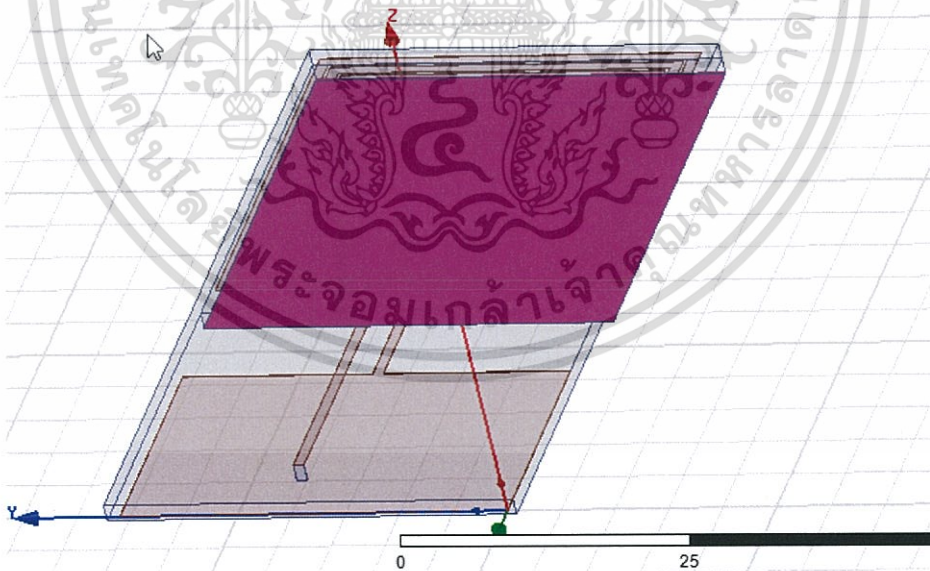


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปลี่ยนชนิดวัสดุเป็น FR4\_epoxy >> OK

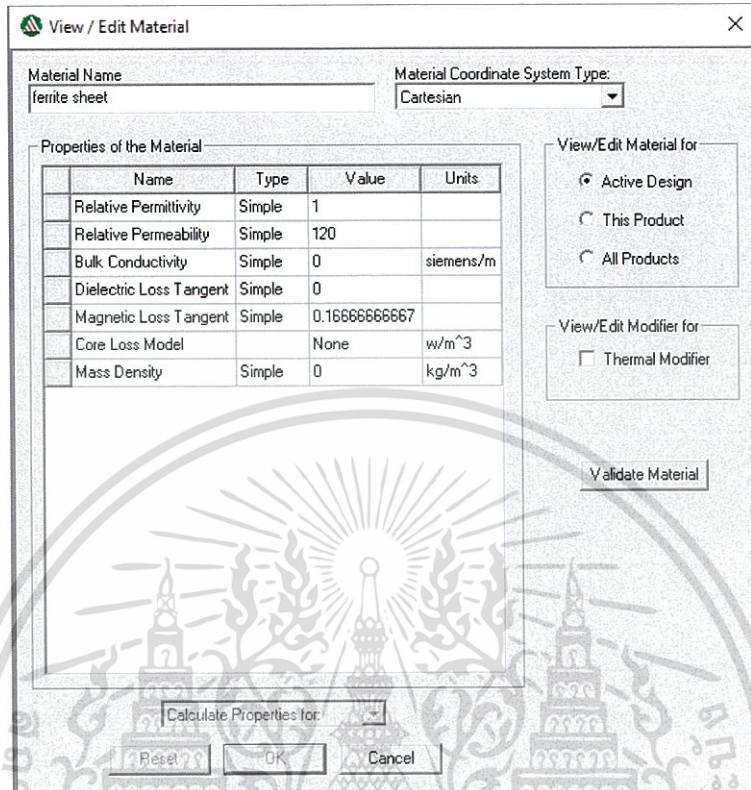


- ใช้เครื่องมือ Draw Box วาดแผ่น Ferrite ขนาด 38 x 38 x 0.1 mm ที่ด้านหลังแผ่น spacer ดังรูป

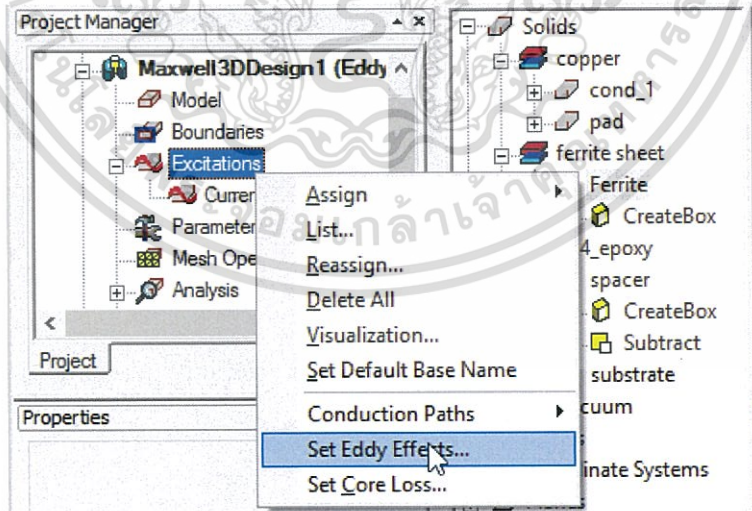


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการเปลี่ยนชื่อเป็น Ferrite จากนั้นคลิกขวาที่ Ferrite >> Assign Material >> Add Material เพื่อเพิ่ม Material Ferrite และใส่ค่าดังรูป >> OK

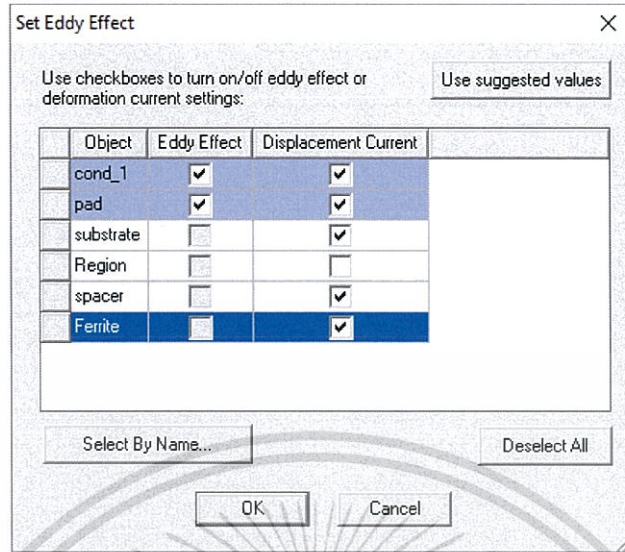


4. จากนั้นไปที่หน้าต่าง Project Manager คลิกขวาที่ Excitations >> Set Eddy Effects...

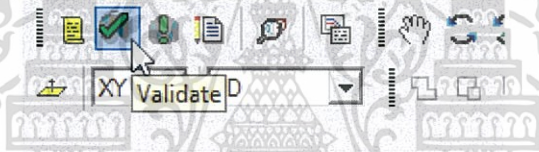


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

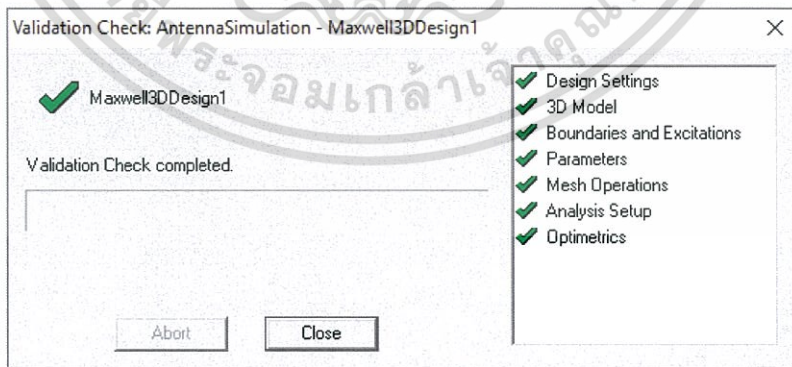
- check เครื่องหมายดังรูป >> OK



### 17. ทำการตรวจสอบความถูกต้องของ model โดยคลิกที่ Validate



- จะได้หน้าต่างดังรูป ถ้ามีเครื่องหมายถูกสีเขียวทั้งหมดแสดงว่า model มีความถูกต้อง การตั้งค่าครบถ้วนพร้อมที่จะทำการ Simulation

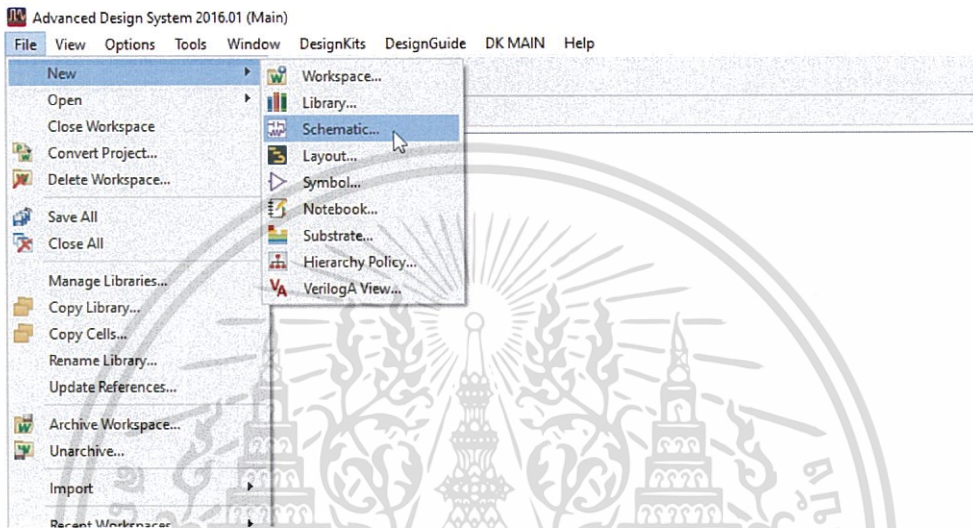


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

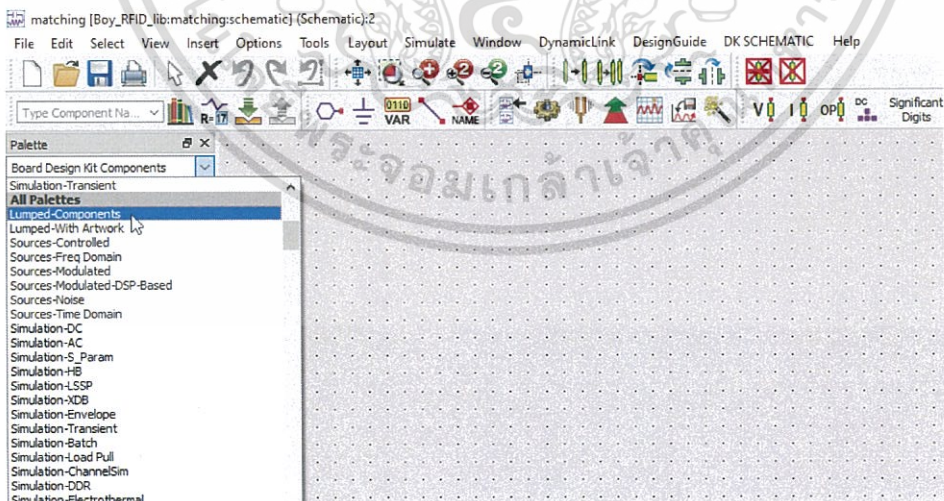
## ภาคผนวก ข

### 1. การจำลองวงจรสายอากาศรวมกับเมทซิงเน็ตเวิร์คโดยใช้โปรแกรม ADS

1. เริ่มจากเปิดโปรแกรม Advance Design System 2016 แล้วทำการสร้าง Schematic โดยคลิกที่ File >> New >> Schematic...

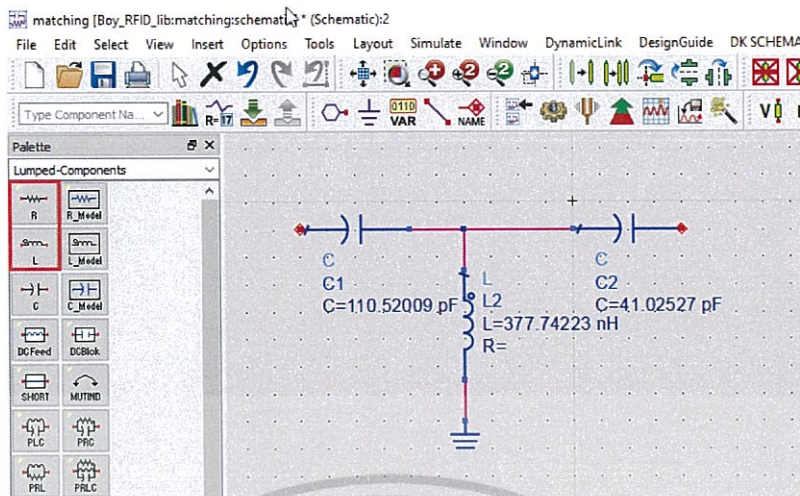


2. จะได้นหน้าต่างดังรูปด้านล่าง จากนั้นคลิกที่ลูกศรให้แถบ Palette เลือก Lumped-Components

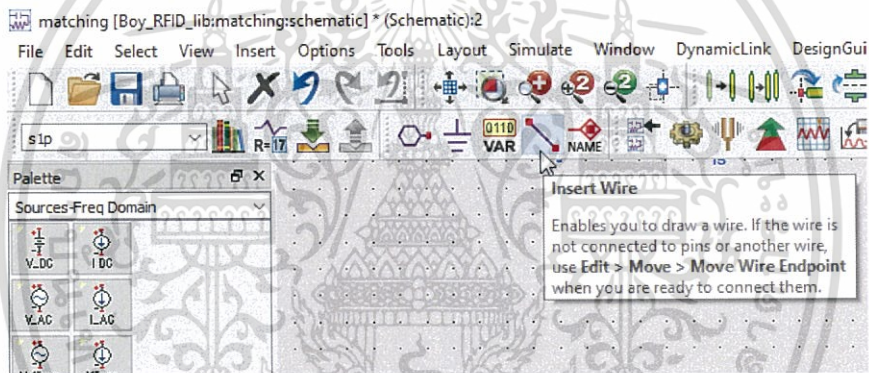


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

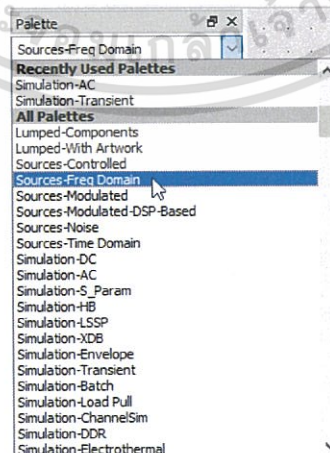
3. จากนั้นเลือกตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมาต่อเป็นวงจรแมทชิ่งดังรูป



โดยใช้เครื่องมือ Insert Wire ดังรูป

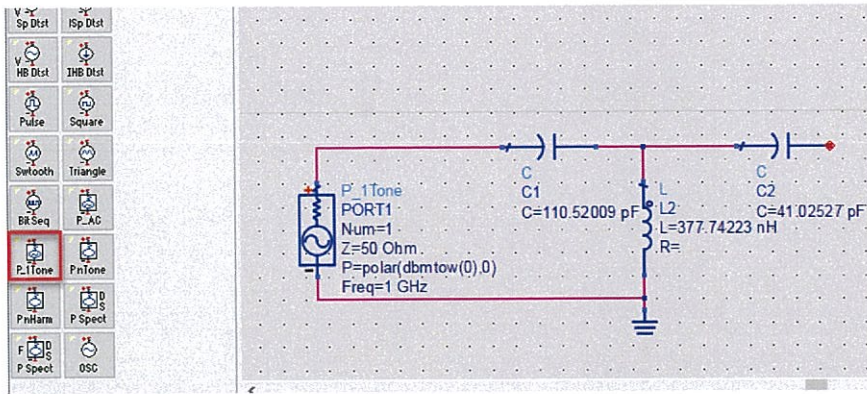


4. เลือก Palette >> Source-Freq Domain >> คลิกเลือกแหล่งจ่าย P\_1Tone ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการต่อแหล่งจ่ายเข้ากับวงจรแมทซิงดังรูปด้านล่าง



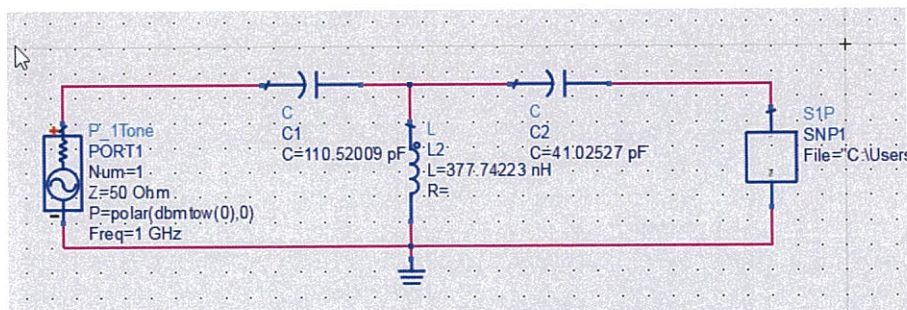
5. บันทึกค่า s parameter ที่ได้จากการวัดสายอากาศแบบ 1 พอร์ตลงในไฟล์สกุล .s1p เมื่อเปิดด้วย Notepad จะมีเนื้อหาภายในไฟล์เป็นดังรูป

```

bare_ant - Notepad
File Edit Format View Help
Measurement 23 June 2016
! sma connector measurement
# hz S ma R 50
! 1 Port Network
! freq magS11 angS11
!
1000000 0.885345371 150.7297042
1745000 0.893706519 116.6306029
2490000 0.914983014 96.12114412
3235000 0.924017531 83.10173623
3980000 0.939288704 76.23889321
4725000 0.946246615 65.46001043
5470000 0.954673096 56.65556573
6215000 0.961610214 50.83817826
6960000 0.96415848 47.14089816
7705000 0.966911095 42.88188951
8450000 0.970035934 38.85749151
9195000 0.972816374 35.63578959
  
```

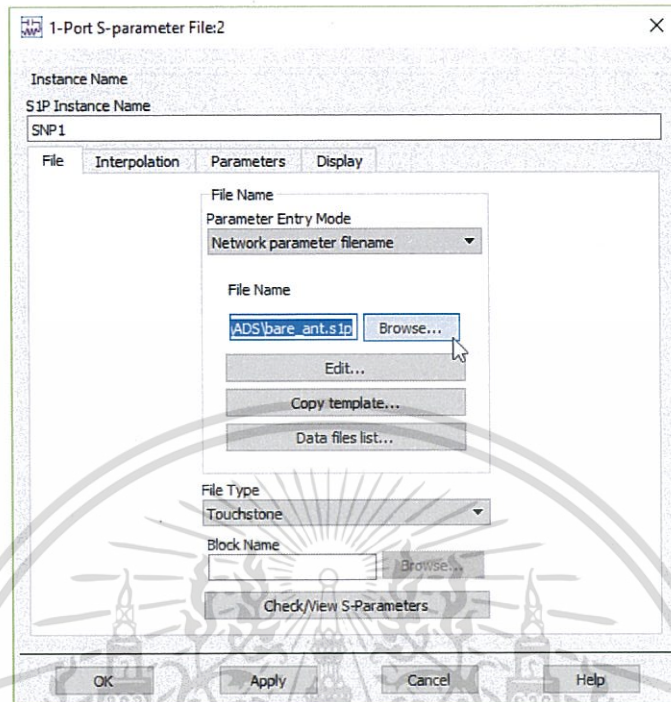
โดยที่คอลัมน์ที่ 1, 2 และ 3 คือความถี่, ขนาดของ s11, มุมเฟสของ s11 ตามลำดับ

6. ที่แถบค้นหาในโปรแกรม ADS ให้พิมพ์ว่า “s1p” จะได้ Component ที่ชื่อว่า s1p ซึ่งจะเปรียบเสมือนเป็นสายอากาศ จากนั้นนำไปต่อเข้ากับอีกฝั่งหนึ่งของวงจรแมทซิงดังรูป

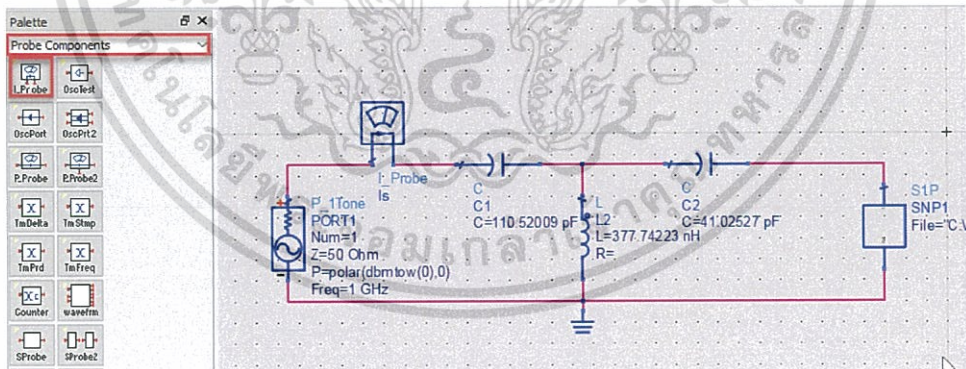


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น double click ที่ s1p >> กด Browse เพื่อเลือกไฟล์ .s1p ที่บันทึกค่า s parameters ของสายอากาศที่เราต้องการจำลอง

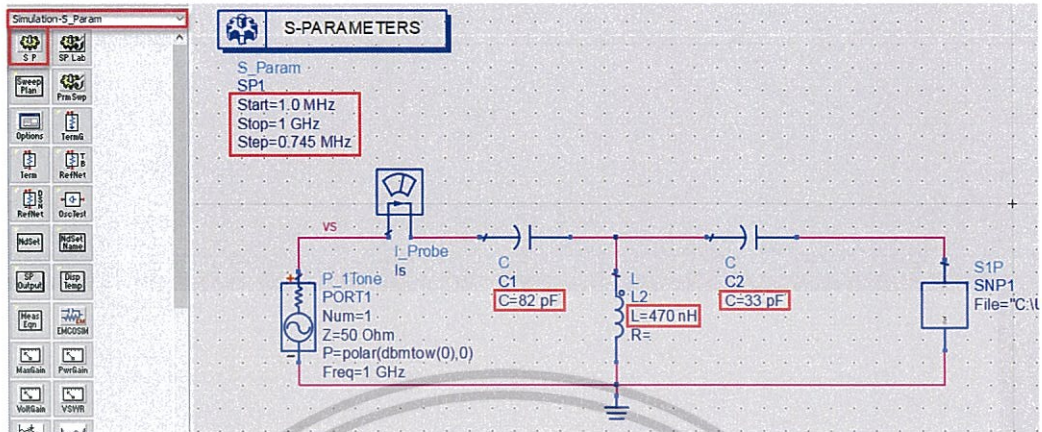


7. ทำการเพิ่ม probe วัดกระแสในกรณีที่ยากทราบค่ากระแสที่ไหลเข้าระบบโดยคลิกที่ Probe Components >> เลือก I\_Probe

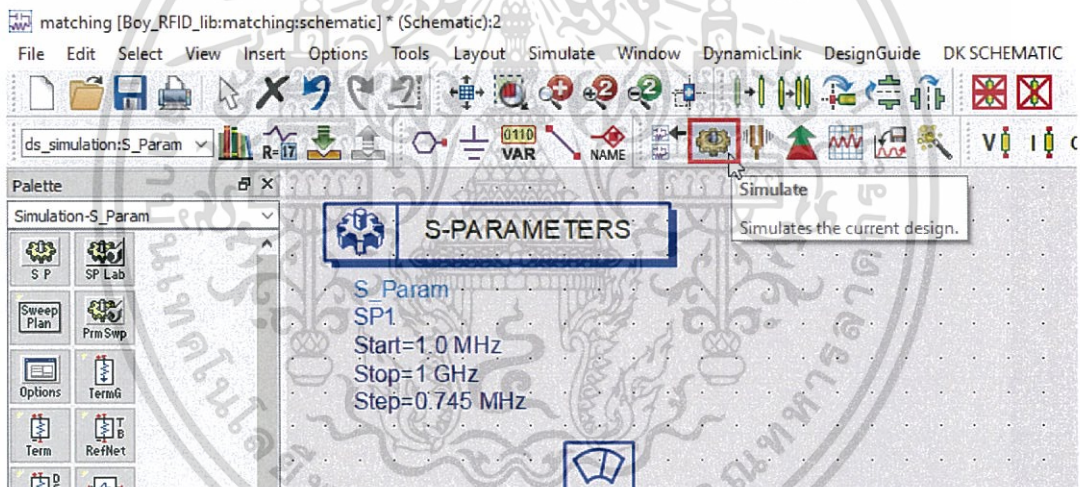


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เลือกรูปแบบการจำลองเป็นแบบ s parameters โดยเลือก Simulation S\_param >> S\_P จะได้ component ดังรูป และเปลี่ยนค่าความถี่เริ่มต้น, ความถี่ที่จะทำการหยุดและ step ดังรูป จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุตามค่าที่จะทำการจำลอง

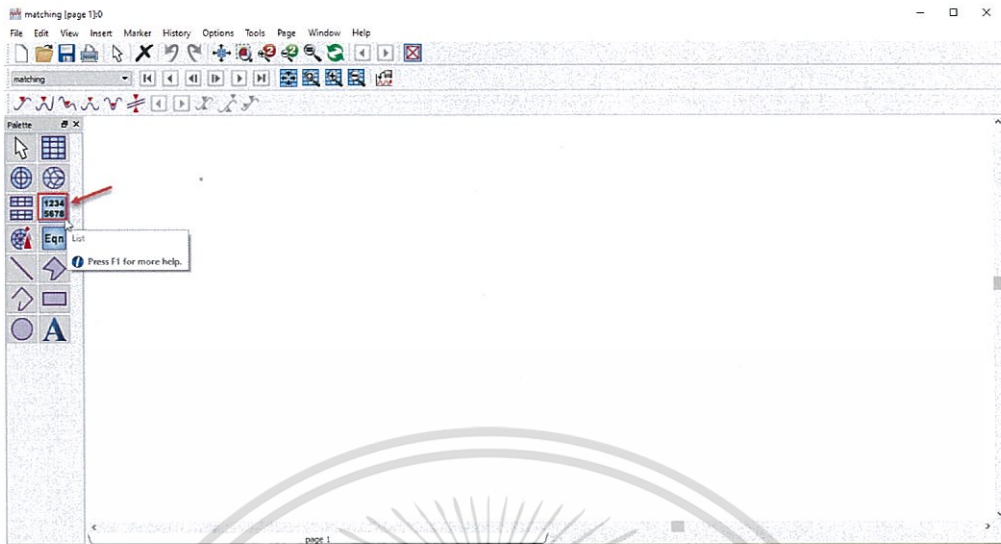


9. จากนั้นคลิกที่ icon รูปเฟืองเพื่อเป็นการเริ่มการจำลอง

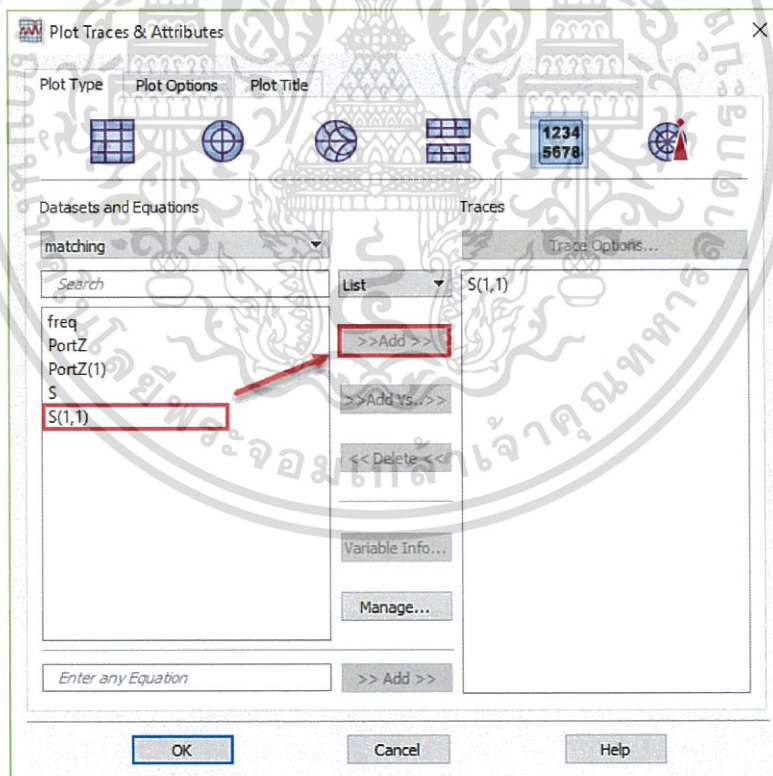


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เมื่อทำการจำลองเสร็จจะได้หน้าต่างว่างๆดังนี้ จากนั้นจะเป็นการเรียกดูค่า s parameters ที่ได้จากการคำนวณ โดยเลือกที่ List เพื่อแสดงค่าในตาราง



11. จะปรากฏหน้าต่างดังรูป จากนั้นทำการเลือกที่ S(1,1) แล้วคลิก Add >> OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. จะได้ตารางแสดงค่า s11 โดยแสดงในรูป ขนาด/มุมเฟส ดังรูป

freq	S(1,1)
1.000 MHz	1.000 / -2.956
1.745 MHz	1.000 / -5.172
2.490 MHz	1.000 / -7.410
3.235 MHz	1.000 / -9.682
3.980 MHz	1.000 / -11.998
4.725 MHz	1.000 / -14.370
5.470 MHz	1.000 / -16.813
6.215 MHz	1.000 / -19.341
6.960 MHz	1.000 / -21.972
7.705 MHz	1.000 / -24.731
8.450 MHz	1.000 / -27.646
9.195 MHz	1.000 / -30.756
9.940 MHz	1.000 / -34.114
10.69 MHz	0.999 / -37.831
11.43 MHz	0.998 / -42.080
12.18 MHz	0.996 / -47.259
12.92 MHz	0.985 / -54.358
13.66 MHz	0.932 / -67.673
14.41 MHz	0.252 / -74.832
15.15 MHz	0.809 / -31.026
15.90 MHz	0.930 / -46.354
16.65 MHz	0.957 / -54.673
17.39 MHz	0.967 / -61.285
18.14 MHz	0.973 / -67.579
18.88 MHz	0.974 / -73.367
19.63 MHz	0.973 / -79.344
20.37 MHz	0.979 / -86.048
21.11 MHz	0.984 / -93.829
21.86 MHz	0.976 / -101.109
22.61 MHz	0.983 / -109.584

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้จัดทำ



- ชื่อ-นามสกุล** นายกิตติพล ก้านขุนทด
- วัน เดือน ปีเกิด** 11 ธันวาคม 2537
- ที่อยู่** บ้านเลขที่ 285 หมู่ 13 หมู่บ้านวังโป่งบูรพา ต.บ้านเก่า อ.ด่านขุนทด  
จ.นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30210 โทรศัพท์ 091-829-5785  
E-mail: Kittipon.kkt@gmail.com
- ประวัติการศึกษา** 2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต วิทยาลัย  
นวัตกรรมการผลิตขั้นสูง  
2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย สาขาวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนราช  
สีมาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้